



Diogo Manuel Morgado Batista da Silva

Licenciado em Ciências da Engenharia Física

Sistema de envelhecimento acelerado para materiais adsorventes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Física

Orientador: Prof. Dr. Grégoire Bonfait,
Professor Associado com Agregação
Universidade Nova de Lisboa

Coorientador: Dr. Daniel Martins
Engenheiro térmico
Active Space Technologies

Júri

Presidente: Prof. Dra. Isabel Catarino

Arguente: Prof. Dr. Orlando Teodoro

Vogal: Dr. Daniel Martins



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2017

Sistema de envelhecimento acelerado para materiais adsorventes

Copyright © Diogo Manuel Morgado Batista da Silva Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Para começar, queria agradecer ao meu orientador, Prof. Grégoire Bonfait, pela oportunidade de trabalhar no Laboratório de Criogenia num projeto bastante interessante, pelo seu comprometimento, compreensão e pela disponibilidade total para transmitir o seu conhecimento, ajudar e guiar. Também queria agradecer ao meu coorientador, Daniel Martins, por ajudar e guiar sempre que possível, pelo contributo que teve no avanço deste projeto.

Este agradecimento estende-se para todos os colegas do Laboratório de Criogenia durante o desenvolvimento deste trabalho, Jorge Barreto, Sofia Alves e João Alho, pela disponibilidade total em ajudar no que estava ao seu alcance e pela companhia valiosa durante esta jornada nas situações mais/menos importantes.

Este projeto não se teria desenvolvido com tanto sucesso sem as habilidades dos técnicos das oficinas do Departamento de Física. Por isso, queria agradecer ao técnico João Faustino, pela ajuda da projeção do sistema mecânico e pela construção das peças do mesmo. Também queria ao técnico Eduardo Jobling pelo seu grande contributo na construção do apoio do sistema mecânico.

Não esquecendo de agradecer a todos os amigos de Setúbal e dos colegas que entraram comigo neste curso por acompanhar nas situações mais complicadas ou relaxantes, por acreditar na minha força de vontade e nas minhas capacidades.

Por fim, queria agradecer aos meus pais por terem dado a oportunidade de ingressar na vida académica, possibilitando instruir a minha pessoa e obter melhores competências para a vida futura profissional e pelo apoio incondicional nas minhas escolhas. Sem esquecer de agradecer aos meus 4 irmãos por me acompanhar nesta longa jornada.

Resumo

O envelhecimento dos materiais pode afetar as suas propriedades relevantes, o que implica que os efeitos relacionados com este envelhecimento sejam estudados para os materiais que serão utilizados durante um longo período de tempo, sem possibilidade de substituição, como é o caso dos materiais com elevada capacidade de adsorção utilizados para aplicações espaciais.

O objetivo desta dissertação é a construção de um sistema termo-mecânico com o intuito de estudar o possível envelhecimento no material adsorvente, submetendo-o a um número de ciclos adsorção-dessorção com uma frequência muito elevada. Foi desenvolvido um atuador linear (deslocamento aproximadamente 70 cm) que permite mergulhar uma célula no azoto líquido (77 K) e aquecê-la a seguir até na gama de temperatura de 400 K em dois minutos. O sistema foi dimensionado tendo em conta os requisitos específicos do material adsorvente, assim como, as propriedades térmicas dos materiais envolvidos. Também foi desenvolvido ao longo do projeto um programa que permite controlar estes ciclos. Alguns testes foram realizados com um primeiro protótipo para verificar o seu bom funcionamento.

Palavras-chave: Envelhecimento, atuador linear, adsorção, criorefrigerador a adsorção.

Abstract

The aging of materials may affect their relevant properties which means the effects related to this aging have to be taken into consideration for materials that are utilized for a vast period of time without the possibility of being replaced, such as materials with a high adsorption capacity used for cryogenic in space applications.

The theme of this dissertation is the construction of a thermo-mechanical system with the purpose of studying the possible aging of adsorbent material(s), submitting it to a specified number of adsorption-desorption cycles at an elevated frequency.

A linear transportation system (approximately 70 cm of travel) has been developed which allows for the dipping of a cell in liquid nitrogen (77 K) heating it to 400K in two minutes. The system was sized in accordance to the specific requisites of the adsorbent material as well as the thermal properties of the used materials. A program that permits us to control these cycles has also been developed. Tests have been conducted with a prototype to verify its performance.

- **Keywords:** Aging, Linear motion system, adsorption, adsorption cryocooler
-

Conteúdo

LISTA FIGURAS	XV
LISTA TABELAS	XVI
1 INTRODUÇÃO	1
2 CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTADO DE ARTE.....	3
2.1 CRYOCOOLER	3
2.2 ADSORÇÃO	4
2.2.1 MATERIAIS ADSORVENTES.....	6
2.3 TIPO DE TESTES DE FATIGA NOS MATERIAIS.....	8
2.4 PROPRIEDADES DE ADSORÇÃO NOS MATERIAS EM FATIGA	8
2.5 ESTADO DE ARTE.....	10
2.5.1 SATÉLITE PLANCK	10
2.5.2 SATÉLITE HERSCHELL	11
2.6 ACTUADOR LINEAR.....	12
3 APRESENTAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA	14
3.1 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA.....	14
3.1.1 DIMENSIONAMENTO DA CÉLULA	14
3.2 AQUECIMENTO	19
3.2.1 CALOR ESPECÍFICO	19
3.2.2 TIPOS DE AQUECIMENTO	21

3.3	ACTUADOR LINEAR.....	23
4	MONTAGEM E CONTROLO.....	27
4.1	MECÂNICA	27
4.2	PRINCIPIO	31
4.3	ELECTRÓNICA DO ATUADOR LINEAR	32
4.4	L298N.....	35
4.5	REGULADOR DE TENSÃO	36
4.6	LABVIEW.....	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
6	CONCLUSÕES.....	45
	REFERÊNCIAS.....	46
	ANEXOS	48

Lista de Figuras

2.1 ESQUEMÁTICO DO <i>CRYOCOOLER</i> DE ADSORÇÃO [1]	3
2.2 DIAGRAMA DOS CICLOS NO COMPRESSOR [2]	5
2.3 ESTRUTURA QUÍMICA DO HKUST-1 [3]	7
2.4 DIAGRAMA DAS PROPRIEDADES DE ADSORÇÃO DO MATERIAL	9
2.5 MODELO DO <i>CRYOCOOLER</i> DE ADSORÇÃO PARA A MISSÃO DE PLANCK [4]	10
2.6 IMAGEM 3D DO REFRIGERADOR DE HERSCHELL [5]	12
2.7 ESQUEMA DO DESLOCAMENTO DO ACTUADOR LINEAR	13
2.8 ACTUADOR LINEAR 200N ELECTRIC LINEAR ACTUATOR [6]	13
3.1 ESQUEMA DO MATERIAL ADSORVENTE NA CÉLULA [7]	16
3.2 QUANTIDADE ADSORVIDA ATÉ 400 K [7]	16
3.3 VOLUME MORTO A 500 K PARA QUATRO VOLUMES	17
3.4 TAXA DE DEGRADAÇÃO DO MATERIAL ADSORVENTE A 400 K	19
3.5 CALOR ESPECÍFICO DO COBRE [8]	20
3.6 CALOR ESPECÍFICO DO INOX AISI316 [8]	20
3.7 ESQUEMA DAS DIMENSÕES DO FORNO DE RADIAÇÃO	22
3.8 TEMPO DE AQUECIMENTO DA CÉLULA	22
3.9 AQUECIMENTO POR INDUÇÃO	23
3.10 ILUSTRAÇÃO DO ACTUADOR LINEAR PROJECTADO PELO SolidWorks™	23
3.11 ILUSTRAÇÃO DO FUSO E ELEMENTOS DIMENSIONAIS DA PORCA [9]	24
3.12 ILUSTRAÇÃO DO CARRO PROJETADO NO SolidWorks™	24
4.1 ACTUADOR LINEAR <i>HOME MADE</i>	27
4.2 ATUADOR LINEAR A) PARTE SUPERIOR B) PARTE INFERIOR	28

4.3 FUSO SEM FIM TRAPEZOIDAL COM PINO [19].....	28
4.4 ILUSTRAÇÃO DO APOIO DO FUSO	29
4.5 PORCA TRAPEZOIDAL DRYLIN DA IGUS [20]	29
4.6 ILUSTRAÇÃO DAS GUIAS DO CARRO	30
4.7 ILUSTRAÇÃO DO ADAPTADOR DO MOTOR	30
4.8 FLUXOGRAMA DO FUNCIONAMENTO DOS CICLOS.....	31
4.9 ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DO ATUADOR LINEAR.....	33
4.10 CIRCUITO DO ATUADOR LINEAR	34
4.11 CAIXA DO CIRCUITO.....	34
4.12 CIRCUITO INTEGRADO L298N	36
4.13 ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE REGULAÇÃO DE TENSÃO.....	36
4.14 REGULADOR DE TENSÃO	37
4.15 TENSÃO NOS TERMINAIS DO MOTOR	37
4.16 INTERFACE DO PROGRAMA DE CONTROLO EM LabVIEW™	38
4.17 INTERFACE CONTROLO PORTAS SERIE E POSICAO EM LabVIEW™	38
5.1 GRÁFICO DO PRIMEIRO TESTE TÉRMICO EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	42
5.2 GRÁFICO DO SEGUNDO TESTE EM FUNÇÃO DO TEMPO	43
5.3 GRÁFICO DO TERCEIRO TESTE EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	43
5.4 CORRENTE E TENSÃO NO AQUECEDOR DE INDUÇÃO	44

Lista de Tabelas

2.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO HKUST-1 [10].....	7
3.1 FOLHA DE CÁLCULO DE DIMENSIONAMENTO DO MOTOR	26



Introdução

O tema desta dissertação está inserido no projeto inicializado em 2015 “Development of a 40 K to 80 K vibration-free cooler” proposto pela Agência Espacial Europeia (ESA- European Space Agency).

Este projeto liderado pela empresa Active Space Technologies com a parceria de dois laboratórios situados na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa: o laboratório de criogenia (Departamento de Física, LIBPhys) e com o laboratório de tecnologia de adsorção (Departamento de Química, REQUIMTE).

Este criorrefrigerador destina-se a um satélite de observação terrestre pertencente à ESA que terá um funcionamento previsto de 5 a 10 anos. Nestes satélites, pretende-se minimizar as vibrações para não provocar ruídos não desejados nos detetores de infravermelhos. Para este tipo de criorrefrigerador, os compressores mecânicos são geralmente a maior fonte de vibrações, sendo, por isso, um compressor de adsorção a melhor opção, devido ao seu funcionamento termoquímico que não exige movimento de partes mecânicas.

Durante o seu período de funcionamento, um número elevado de ciclos adsorção-dessorção ocorridos no compressor poderá alterar as propriedades do material adsorvente devido aos ciclos térmicos e mecânicos, provocando o seu envelhecimento. Este envelhecimento provoca a diminuição da taxa de adsorção do material, o que é problemático pois reduz a eficiência do criorrefrigerador.

Então uma forma de estudar o envelhecimento do material adsorvente é submete-lo a ciclos de adsorção-dessorção a uma frequência muito elevada.

Uma forma de realizar este estudo, tema desta dissertação, é a construção de um sistema termomecânico para fatigar termicamente e mecanicamente o material adsorvente, permitindo assim estudar as propriedades de adsorção em função de um número de ciclos elevado.

Contextualização e estado de arte

2.1. Criorrefrigerador de adsorção

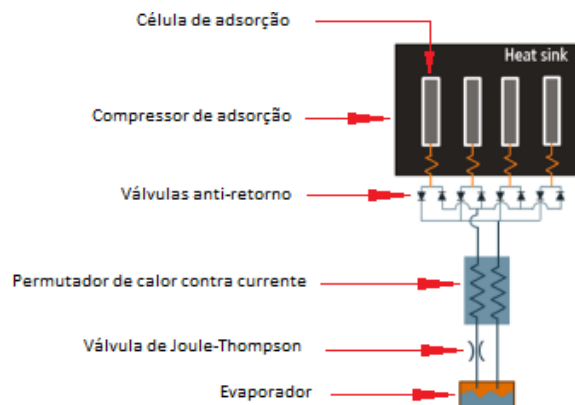


Figura 2.1: Esquemático do criorrefrigerador de adsorção [1].

O funcionamento dos compressores de adsorção baseia-se na adsorção de um gás num material muito poroso, como é o exemplo do carvão ativado ou dos MOFs (*Material Organic Framework*) que estão inseridos numa célula.

Quando a célula de adsorção é arrefecida permite a adsorção do gás (fluido de trabalho) que entra na baixa pressão. A alta pressão, por sua vez, resulta da dessorção do gás devido ao aumento da temperatura do material adsorvente [2].

Nos compressores de adsorção associados a criorefrigeradores de tipo *Joule- Thomson (J-T)* (Fig. 2.1) normalmente usam-se várias células de adsorção funcionando em anti-fase e válvulas antirretorno, à saída das células, para evitar grandes flutuações de caudal e de poder frigorífico do criorefrigerador. O fluido de trabalho ao passar no permutador de calor, contra corrente, vai arrefecer para entrar na válvula de *J-T* à temperatura desejada. Na válvula de *J-T* o fluido é restringido e na própria vai ocorrer uma expansão isentálpica chamada expansão de *J-T*.

O fluido ao ser arrefecido é parcialmente liquefeito e armazenado no evaporador que forma o dedo frio do criorefrigerador. Essa parte é a zona mais fria do criorefrigerador que corresponde à temperatura de saturação do fluido. A potência térmica gerada pelos detetores de infravermelhos é transferida para este dedo frio que leva à evaporação do líquido formado. O vapor resultante é transferido para o permutador de calor da parte de baixa pressão para arrefecer o fluido quente. Depois é enviado para uma “célula de adsorção fria” do compressor onde será armazenado. Esta célula será aquecida mais tarde e servirá de compressor e assim sucessivamente [3].

2.2. Adsorção

Quando as moléculas de um fluido “aderem” à superfície de um sólido, esse fenómeno é conhecido por adsorção. A adsorção ocorre quando a superfície de um sólido é exposta a um fluido. A diferença entre absorção e adsorção é que na absorção a interação entre as moléculas do fluido e do material ocorre no volume todo do material, enquanto que na adsorção as interações ocorrem na superfície do material.

A interação entre o gás e a superfície do material pode ser um pouco complexa devido ao facto de as moléculas do fluido apresentarem diversos tamanhos e propriedades elétricas (momentos dipolares e momentos quadripolares). Para aplicações na área da criogenia, o carvão ativado é o mais utilizado [4].

A figura 2.2 representa um exemplo de isotérmicas de adsorção e a sua aplicação num ciclo de adsorção. Na fase A, a célula é aquecida resultando a dessorção do gás. Com a dessorção ocorre um aumento da pressão e ao atingir a alta pressão no fluido (Fig. 2.2) é aberta a válvula de antirretorno de alta pressão e o gás adsorvido sai da célula para a válvula de Joule-Thomson na fase B. Na fase C, com o arrefecimento da célula, ocorre um processo de adsorção, o que leva a uma redução da pressão. Na fase D, quando a pressão da célula é inferior à da linha de baixa pressão do circuito J-T, a válvula de antirretorno da baixa pressão abre e o gás proveniente da expansão de J-T diminui é enviado para a célula [2].

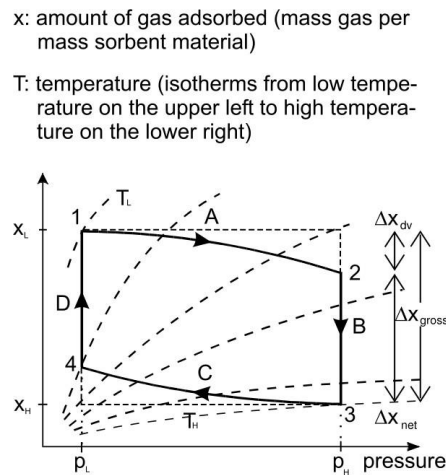


Figura 2.2: Diagrama dos ciclos de adsorção do compressor [5].

Adsorção física:

Na adsorção física, as moléculas e átomos interagem através das interações de van der Waals e forças de dispersão correspondentes às interações dipolo-dipolo. Este processo corresponde às interações de baixa energia entre as moléculas adsorvidas e a superfície do material adsorvente. É um processo exotérmico, pois a variação da entalpia das moléculas adsorvidas é negativa, reversível, o que leva a uma redução da pressão do gás adsorvente e a um aumento da temperatura. Devido às interações de longo alcance, é possível ocorrer adsorção em múltiplas camadas, dependendo das forças de interação e é um processo reversível. Este projeto irá focar-se mais na adsorção física.

Adsorção química:

Na adsorção química, as moléculas/átomos da superfície adsorvente e as moléculas adsorvidas interagem entre si quimicamente, onde há alteração das propriedades químicas do material adsorvente criando ligações de alta energia devido à transferência de elétrons, sendo assim, um processo muito mais exotérmico em geral que os processos de adsorção física: em geral, estes processos de adsorção não são muito utilizados a baixa temperatura. As interações entre moléculas e/ou átomos adsorvidos e o material adsorvente são de curto alcance e a adsorção ocorre numa camada [6].

2.2.1. Materiais adsorventes

Entre os materiais adsorventes mais utilizados para aplicações na área da criogenia, destaca-se o carvão ativado devido à sua estrutura cristalina bem definida e muito estável. É, também, um material adsorvente resistente aos ciclos térmicos, como já foi demonstrado pela sua utilização em várias aplicações do mesmo género. Graça ao processo de ativação, este apresenta uma porosidade muito elevada que conduz a uma superfície específica muito alta ($800 \text{ m}^2/\text{g}$ - $1500 \text{ m}^2/\text{g}$) e volume de porosidade baixo ($0.2 \text{ cm}^3/\text{g}$ - $0.6 \text{ cm}^3/\text{g}$) [7].

Outro tipo de materiais que podem ser utilizados para processos de adsorção são os MOF's (Metal Organic Framework). Os MOF's são materiais com um grau de porosidade muito elevado e com uma área de superfície elevada (aproximadamente $5500 \text{ m}^2/\text{g}$) [8].

Os MOF's são menos utilizados em criogenia devido à sua estrutura orgânica e complexa que, ao serem submetidos a ciclos térmicos, podem sofrer alterações nas suas propriedades de adsorção, como é o caso do HKUST-1 [9]. É importante mencionar que o HKUST tem uma temperatura de decomposição da ordem dos 300°C (573 K).

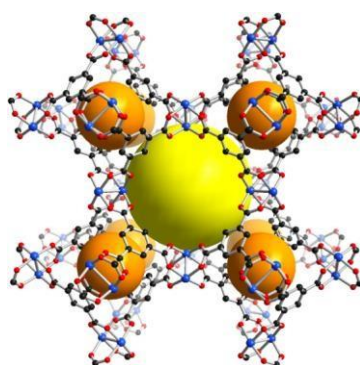


Figura 2.3: Estrutura química do HKUST-1. As esferas amarelas e cor de laranja evidenciam o espaço livre para a adsorção [9].

Propriedades	HKUST-1
Nomenclatura química	$\text{Cu}_3(\text{BTC})_2$
Condições de ativação	423 K em vácuo (durante 10 h)
BET área de superfície	$1500\text{-}2100 \text{ m}^2/\text{g}$
Tamanho da partícula	$16 \mu\text{m}$
Densidade	$0.35 \text{ g}/\text{cm}^3$

Tabela 2.1: Propriedades físicas do HKUST-1 comercializado como “*Basolite™ C300*” e produzido na Sigma Alderich, Alemanha [8].

2.3. Tipos de testes de fadiga nos materiais

Os testes de envelhecimento/fadiga nos materiais têm como objetivo estudar o tempo de vida de materiais, peças ou máquinas, alterações das propriedades cristalinas, testar pontos de fratura ou deformação. Existem 3 tipos de testes de fadiga termomecânicos, com ciclos de stress de amplitude constante [10]:

- *Routine test*: Teste que, ao aplicar um número elevado de ciclos de stress (entre 10000 e 1000000), pretende detetar alterações no material (propriedades físicas e químicas).
- *Short-time test*: Teste de número de ciclos curtos (menor que 10000) que tem como objetivo a redução do tempo de vida do material de forma a estudar as suas danificações.
- *Long-time test*: Teste de número de ciclos elevados (maior que 1000000) que é usado para se observar a inexistência de alterações nas propriedades do material.

2.4. Propriedades de adsorção nos materiais no envelhecimento

Para estudar o possível problema de envelhecimento, submete-se o material adsorvente a ciclos de aquecimento e arrefecimento num dado período de tempo de forma a testar as alterações das propriedades de adsorção. Isto permite estudar a evolução da quantidade adsorvida em função de um número elevado de ciclos de pressão e temperatura.

No início do processo o material contém as propriedades de adsorção originais, isto é, durante o arrefecimento, o gás é adsorvido no material adsorvente e, no aquecimento, ocorre a dessorção do gás no mesmo. Mas ao fim de um número elevado de ciclos, se ocorrer decomposição do material, irá ocorrer um aumento de pressão no interior da célula, uma vez que a quantidade adsorvida de gás no material é inferior (Fig. 2.4).

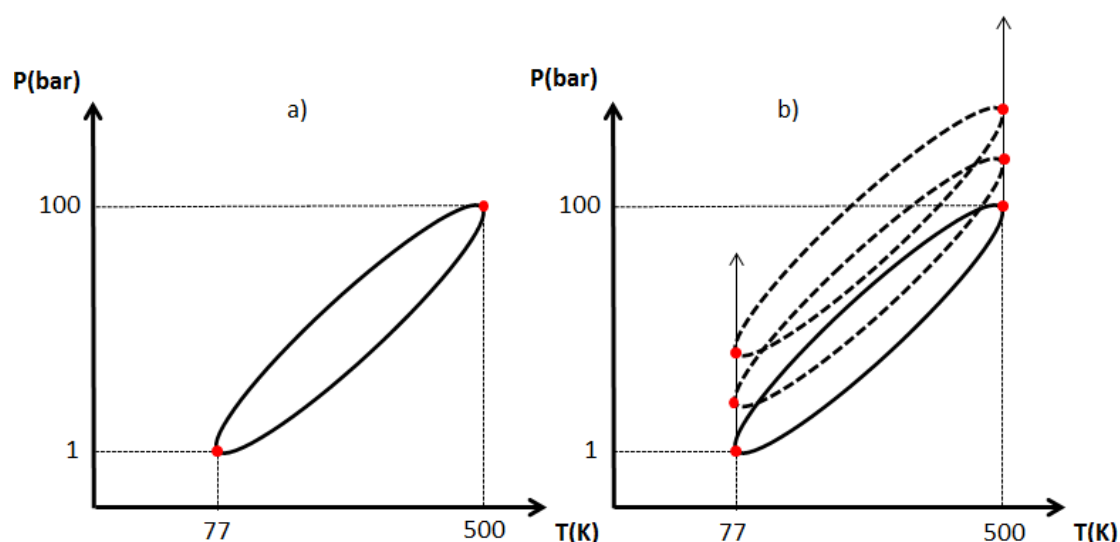


Figura 2.4: Diagrama das propriedades de adsorção do material a) No início do teste, para um sistema fechado, o arrefecimento corresponde a uma diminuição da pressão b) Esquema de alteração dos ciclos P-T ao longo dos testes de envelhecimento: para a mesma temperatura fria, a pressão sobe indicando que a quantidade adsorvida diminui.

2.5. Estado de arte

2.5.1. Satélite Planck

A sonda espacial Planck, pertencente também à ESA, tinha como missão o estudo da expansão do universo medindo a anisotropia da radiação microondas cósmica do fundo do universo, com a duração de 3 anos. Este sistema foi dimensionado para observar numa gama de frequências de 30 GHz a 857 GHz. Para tal, são utilizados dois tipos de dispositivos: um para altas frequências e outro para baixas frequências, ambos com a necessidade de estarem sujeitos a temperaturas entre 20 K e 100 mK para obter a resolução adequada. O sistema de arrefecimento foi desenvolvido pelo Jet Propulsion Laboratory e incluiu dois criorrefrigeradores (um deles redundante) de adsorção tipo J-T utilizando o hidrogénio como gás de trabalho. O arrefecimento é utilizado para dois objectivos distintos: arrefecimento direto na parte das baixas frequências abaixo de 22.5 K e pré-arrefecimento de um criorrefrigerador J-T a 4 K. A temperatura final necessária para o dispositivo de baixas frequências era abaixo de 100 mK e para o de altas frequências abaixo dos 450 mK. A missão obteve sucesso com uma duração de 3 anos e material adsorvente usado nas células de adsorção do compressor do criorrefrigerador de 20K foi o $\text{La}_{1.0}\text{Ni}_{4.78}\text{Sn}_{0.22}$ [11].

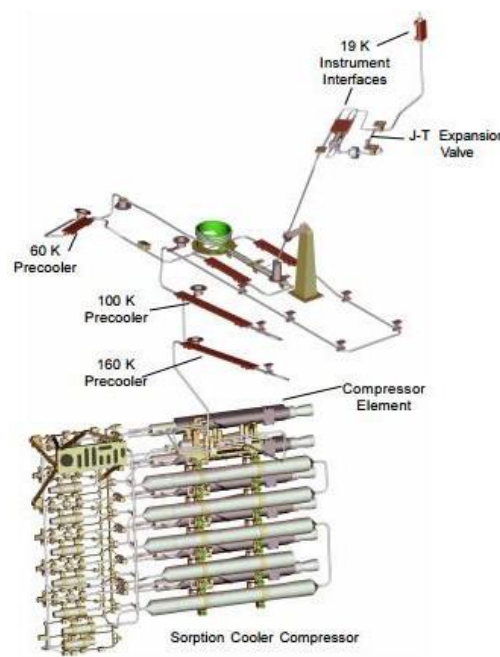


Figura 2.5: Modelo do *cryocooler* de adsorção para a missão de Planck [12].

2.5.2. Satélite Herschel

A missão de Herschel pertencente à ESA, iniciou em 2009, e pretendia investigar a dinâmica e evolução estrutural das galáxias para estudar a formação de estrelas e planetas através da observação espectroscópica de alta resolução nas gamas as radiações infravermelhas e submilimétricas. O satélite de Herschel continha um telescópio com um diâmetro de 3.5 m que está localizado a 1.5×10^6 km além da órbita da Terra em torno do sol num ponto geoestacionário denominado por *Ponto de Lagrange L2*.

Este telescópio continha 3 instrumentos: HIFI (*heterodyne instrument far infrared*) que operava na gama de 157-625 μm , SPIRE (*spectral and photometric imaging receiver*) que operava na gama de 200- 670 μm e PACS (*photodetector array camera and spectrometer*) que operava na gama de 60-210 μm .

Para providenciar observações astronômicas e resoluções muito altas era necessário que os detetores funcionassem a uma temperatura de 300 mK. Para tal, o arrefecimento dos detetores baseava-se em dois refrigeradores de adsorção de hélio 3 desenvolvidos pela CEA-SBT (*Service des Basses Températures of the commissariat à l'Energie Atomique*). Estes refrigeradores [13] baseavam-se num ciclo evaporativo de hélio (^3He) líquido sem movimento de partes mecânicas, utilizando uma bomba de adsorção de carvão ativado, linha de bombeamento, um evaporador constituído de um material poroso para reter o líquido e alguns interruptores térmicos para controlar a temperatura nas várias fases.

Na bomba de adsorção, composta por carvão ativado num reservatório fechado, era possível aumentar ou diminuir a pressão do (^3He) variando a temperatura da bomba. Ao atingir uma temperatura abaixo da temperatura crítica do hélio 3 de 3.2 K, o gás podia ser comprimido até liquefazer. Depois, ao baixar a pressão de equilíbrio, a temperatura de condensação do líquido era reduzida. Esta missão obteve sucesso com uma duração de 4 anos.

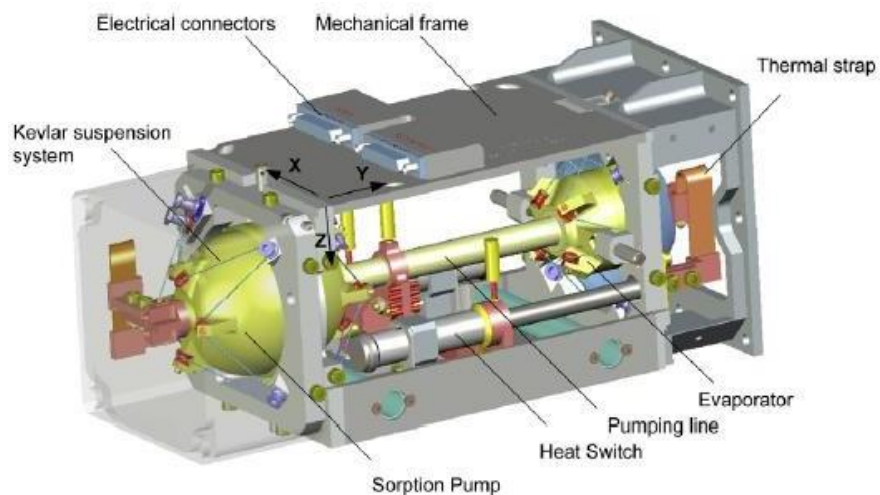


Figura 2.6: Imagem do refrigerador de Hershell [13].

2.6. Atuadores lineares

O atuador linear é o órgão responsável pelo movimento da célula entre as zonas de aquecimento e arrefecimento (Dewar com azoto liquido) de forma a simular o número de ciclos de adsorção-dessorção que irá ocorrer nas células de adsorção do compressor. O mesmo requer que a célula seja movida totalmente fora do dewar para que o aquecimento não seja afetado pela condensação dos vapores de azoto. Então é necessário que a célula percorra uma distância vertical mínima de 60 cm. No arrefecimento até 77 K (Fig. 2.7 a), a célula será submergida em azoto líquido dentro de um dewar. De seguida, a célula é movida na vertical até ao aquecimento por indução, onde será aquecida até à temperatura de 400K.

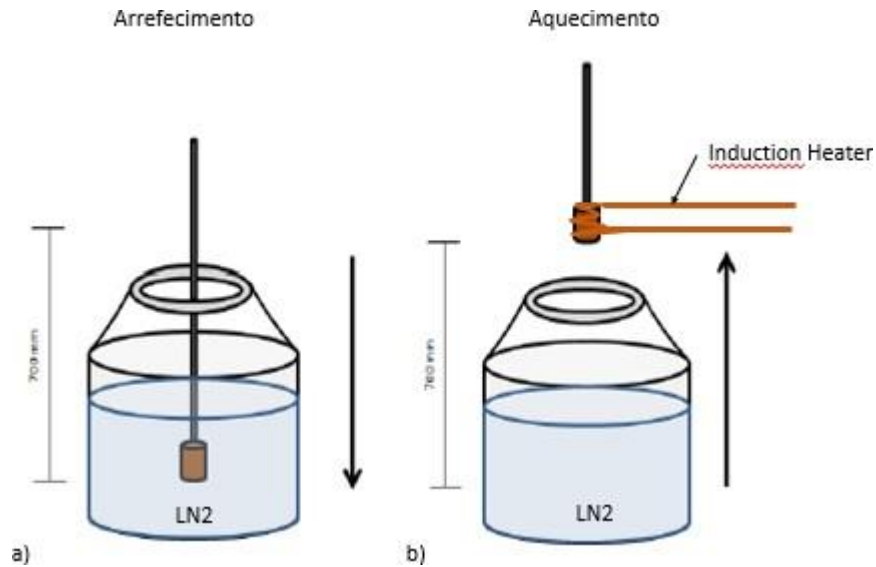


Figura 2.7: Esquema do deslocamento do atuador linear.

No mercado, existem sistemas lineares, tais como o sistema linear de Igus (fig. 2.8), que correspondiam com os requisitos para este projeto.



Figura 2.8: Atuador linear 200N Electric Linear Actuator [14].

Mas, como este tipo de sistemas para estas condições são dispendiosos, a opção mais viável foi a construção de um sistema de elevador devido à sua facilidade de montagem e de funcionamento.

Apresentação e dimensionamento do sistema

3.1. Apresentação do sistema

O objetivo deste projeto é a construção de um sistema de envelhecimento acelerado de materiais adsorventes de forma a estudar as alterações das propriedades de adsorção destes materiais, submetendo-os a um elevado número de ciclos de temperatura e pressão numa gama de 77 K a 400 K e 1 bar a 100 bar respetivamente de forma que os ciclos sejam suficientemente rápidos para poder simular o número de ciclos significativo em relação ao que ocorrerá neste criorefrigerador. Para o arrefecimento, a célula será mergulhada em azoto líquido inserido num "dewar". Para o aquecimento será explicado mais à frente as diferentes hipóteses de aquecimento que se propôs e qual destas a mais viável.

3.1.1. Dimensionamento da célula

A célula que contem os materiais adsorventes tem que ser dimensionada de forma a que, durante a adsorção a 77 K, atinja uma pressão de 1 bar e durante a dessorção a 400 K atinja uma pressão de 100 bar.

Para este dimensionamento, serão utilizadas os resultados da quantidade adsorvida em função da temperatura e da pressão obtidos pelo Mário Xavier na gama de temperatura 77 K-500 K e pressão 1 bar-100 bar utilizando néon [15].

Para este sistema são necessários sensores de pressão, válvulas e capilares para as ligações da célula. Este tipo de instrumentação contém volumes próprios à temperatura ambiente, que são denominados por volumes mortos, que são necessários ter em conta para os cálculos da pressão a uma dada temperatura em função do número de moles no sistema.

Para demonstrar o impacto dos volumes mortos na pressão no interior da célula, utilizou-se as dimensões da célula desenvolvida por Mário Xavier com um volume no interior da célula de 7.6 cm³ e os cálculos da pressão com material adsorvente HKUST-1 inserido na célula enchida com o gás néon.

No sistema (célula e volumes mortos) fechado, durante os ciclos, existe conservação do número de moles, isto é, o número total de moles é constante tanto no aquecimento a 500 K como no arrefecimento a 77 K. A expressão que traduz o balanço a uma pressão de equilíbrio e uma temperatura é:

$$N_{\text{total}}(P, T) = N_{V_{\text{célula}}} + N_{V_g} + N_{V_0}(P, T_{\text{amb}}) \quad (3.1)$$

Onde N_{total} é o número total de moles no sistema, $N_{V_{\text{célula}}}$ é o número de moles adsorvidas no material adsorvente inserido na célula, N_{V_g} é o número de moles no volume gasoso da célula e N_{V_0} é o número de moles no volume morto suposto inteiramente a temperatura ambiente. O número de moles adsorvidas no material adsorvente pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$N_{V_{\text{célula}}} = V_{\text{célula}}(\varepsilon \rho_g(P, T) + (1 - \varepsilon) \rho_p q^*(P, T)) \quad (3.2)$$

Onde $V_{\text{célula}}$ é o volume da célula, ε é o fator de empacotamento (fig. 3.1), ρ_g é a densidade do gás a uma dada pressão e temperatura, q^* é a quantidade adsorvida no material e ρ_p é a densidade aparente da partícula, que representa a densidade mássica de cada partícula do material adsorvente. O fator de empacotamento representa a razão entre o espaço livre entre as partículas do material adsorvente e o volume total da célula.

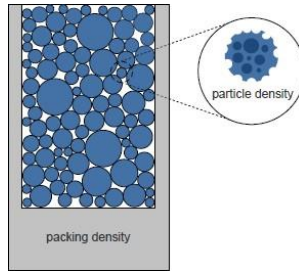


Figura 3.1: Esquema do material adsorvente na célula [15].

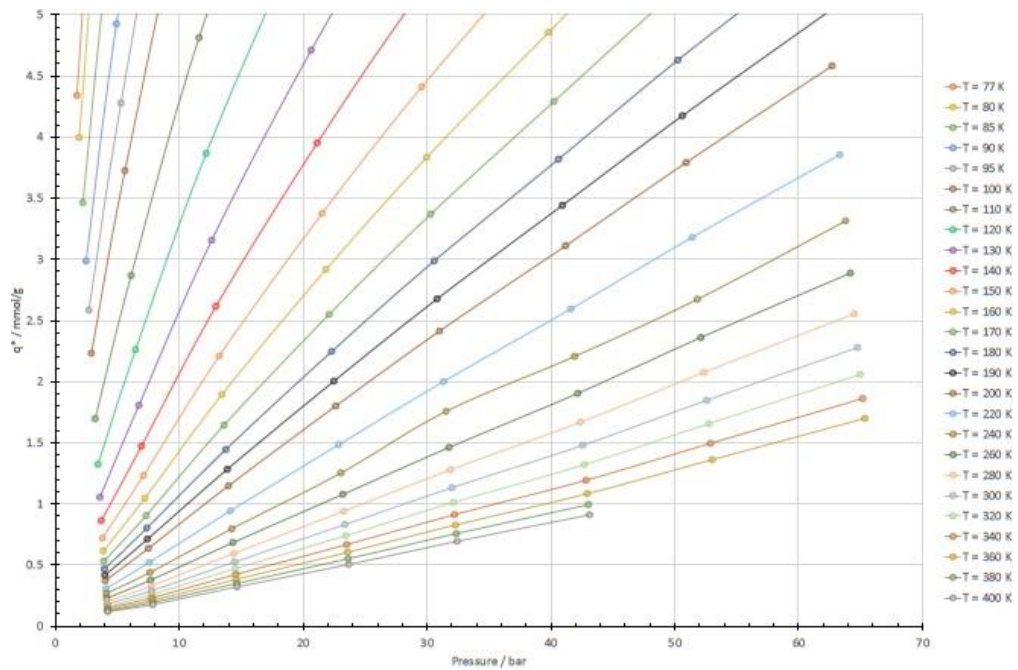


Figura 3.2: Quantidade adsorvida até 400 K [15].

Os valores de adsorção em função da pressão para várias temperaturas (isotérmicas de adsorção) estão representados da figura 3.2. Na figura apenas é apresentada a quantidade adsorvida até 400 K, mas para mais altas temperaturas: da quantidade adsorvida são até aos 400 K e mostram que, para as altas temperaturas:

$$q^* = \alpha P \quad (3.3)$$

Extrapolando até 500 K, o declive da reta de calibração pode ser obtido por:

$$\alpha = \frac{1}{0.1757T - 23.77} \quad (3.4)$$

Considere-se o seguinte exemplo: para um volume interno da célula de 7.6 cm³ e volume morto de 5.7 cm³, quando a célula é arrefecida a 77K e a pressão do sistema é 1 bar, o aumento de pressão correspondente ao aumento da temperatura a 500 K é apenas de 45 bar. Este exemplo evidencia a importância dos volumes mortos, isto é, as moléculas pertencentes ao volume morto limitam o processo de adsorção do gás no material adsorvente devido ao efeito de *buffer*. Com o objetivo de atingir 100 bar a 500 K, foi necessário calcular a variação dos volumes mortos com a variação do volume da célula, utilizando as equações anteriores e os resultados da figura 3.3.

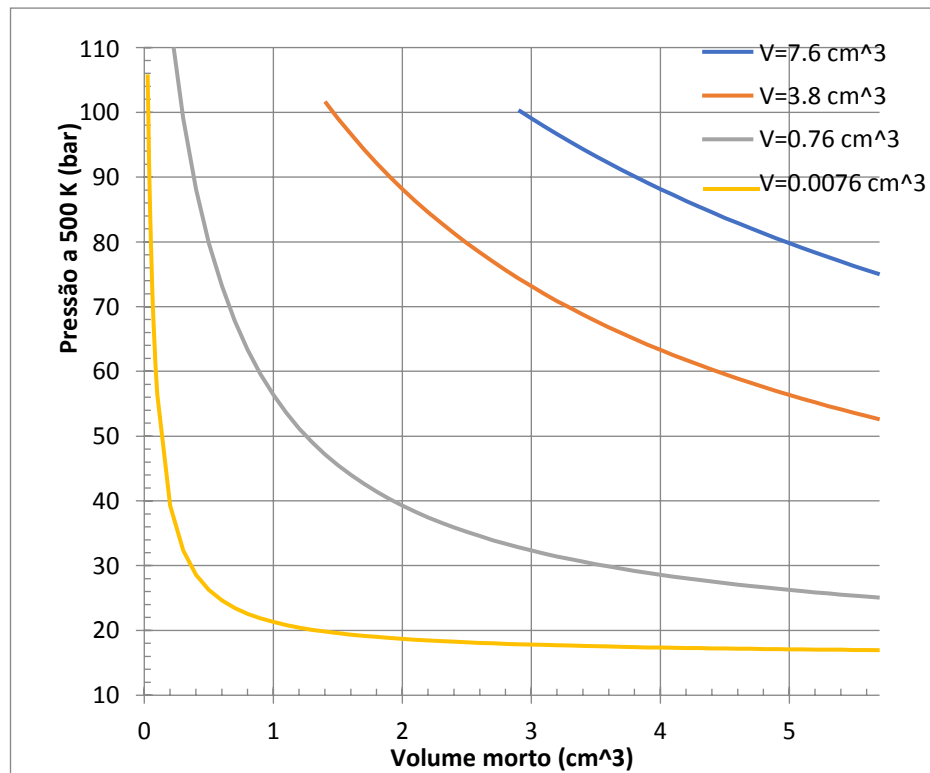


Figura 3.3: Volume morto a 500 K para quatro volumes.

É de notar que quanto menor for o volume da célula, maior a necessidade de minimizar o volume morto.

Por outro lado, como iremos ver nas secções seguintes, um aumento do volume da célula irá resultar numa célula que irá gastar mais azoto líquido durante o processo de arrefecimento e mais difícil de aquecer. Um compromisso entre estes dois constrangimentos tem que ser encontrado.

No caso de ocorrer uma degradação do material adsorvente, ao fim de um elevado número de ciclos, as suas propriedades de adsorção serão diminuídas. Isto é, a 77 K a taxa de adsorção do material será cada vez menor, bem como a 500 K o que resultará num aumento da pressão do sistema. De forma a prever o efeito da degradação do material na pressão (Fig 2.4), calculou-se a pressão, neste caso, a uma temperatura de 400 K, impondo que nos primeiros ciclos a célula atinja os 100 bar à temperatura de 400 K e que no arrefecimento ocorra o enchimento de LN2 na célula para atingir a pressão de 1 bar. Para tal, uma célula com volume de 0.2 cm³ e volume morto de 0.66 cm³, fator de empacotamento de 64% e fator de enchimento de LN2 de 89%.

Para o número de moles no volume morto no aquecimento utilizou-se a equação dos gases ideais à temperatura ambiente.

$$N_{V_o}(P = 100 \text{ bar}, T = 300 \text{ K}) = \frac{PV_o}{RT} \quad (3.5)$$

Para o número de moles no volume gasoso livre da célula no aquecimento utilizou-se a mesma equação para a temperatura de 400 K e pressão de 100 bar.

$$N_{V_g}(P = 100 \text{ bar}, T = 300 \text{ K}) = \frac{PV_g}{RT} \quad (3.6)$$

O número de moles adsorvidas no material adsorvente é calculado pela seguinte expressão:

$$N_{V_{célula}} = m q^* V_{célula} (\varepsilon - 1) * 0.89 \quad (3.7)$$

Onde 0.89 representa o fator de enchimento inicial com LN2.

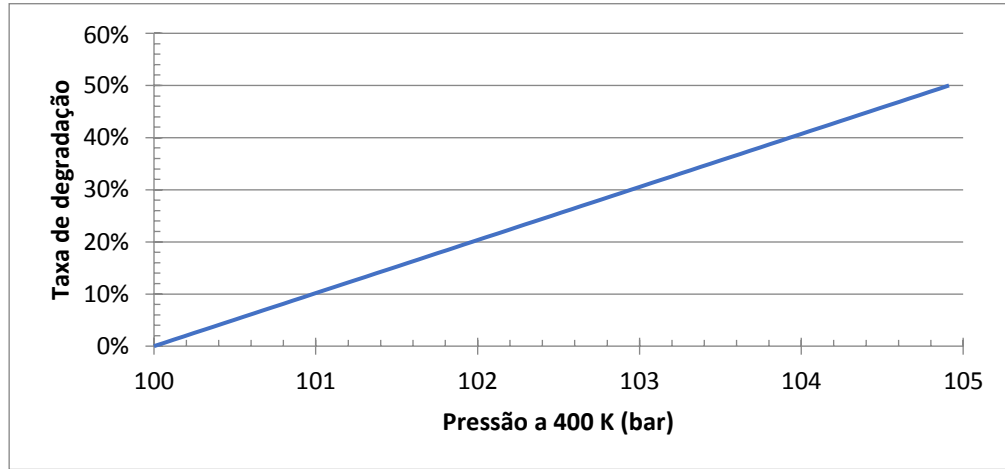


Figura 3.4: Taxa de degradação deduzida com o aumento da pressão a 400 K.

A pressão na célula pode então ser calculada utilizando um fator de degradação f que leva a uma diminuição da quantidade adsorvida $q^*(1 - f)$. A figura 3.4, mostra o aumento da pressão no interior da célula a 400 K em função desta taxa de degradação. Com os valores de volumes indicados, uma degradação de 10% da adsorção leva a um aumento de 1 bar: julgou-se que este valor era perfeitamente mensurável, validando assim este primeiro dimensionamento.

3.2. Aquecimento

3.2.1. Calor específico

Para este sistema foram propostos dois tipos de célula: cobre e aço inoxidável AISI 316. Para saber qual é a evolução térmica para cada material com uma determinada massa até uma certa temperatura T para a mesma quantidade de calor é necessário saber o calor específico destes dois materiais. Para pressão constante tem-se:

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p = \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_p \quad (3.8)$$

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} C_p dT = H(T_f) - H(T_i) \quad (3.9)$$

Em que Q é o calor fornecido a um corpo por unidade de massa m . A partir do calor, pretende-se descobrir a potência térmica que é necessária para aquecer a célula de adsorção até os 400 K. Então:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \quad (3.10)$$

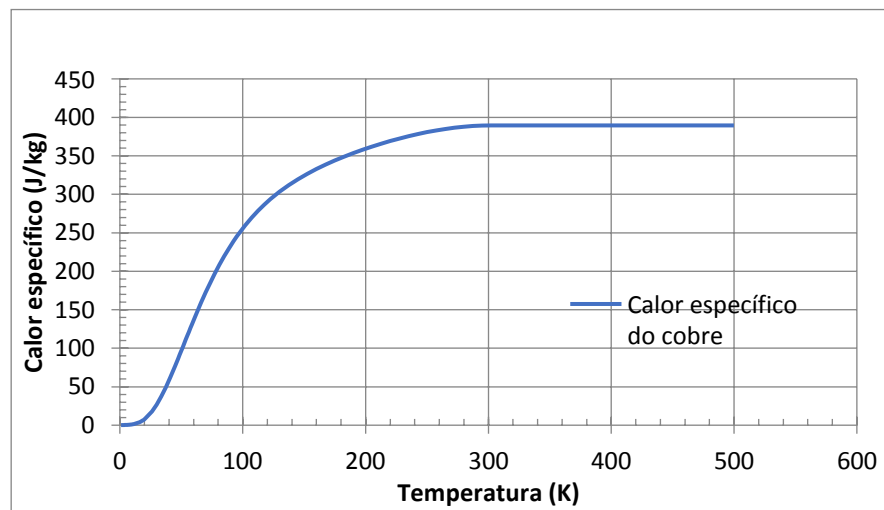


Figura 3.5: Calor específico do cobre [16] utilizado para os cálculos [17]. Para $T > 293$ K, foi suposto $C_p = C_p(293K)$.

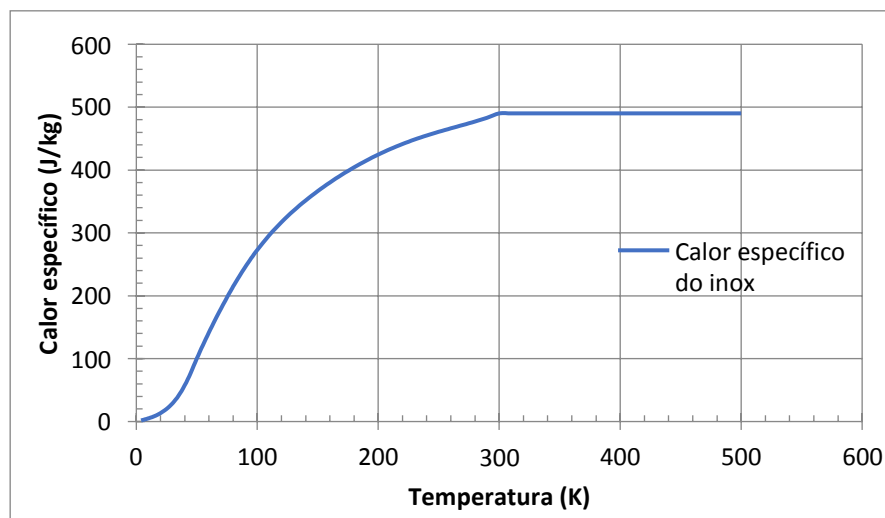


Figura 3.6: Calor específico do aço [16] inoxidável AISI 316 utilizado para os cálculos [17]. Para $T > 293$ K, foi suposto $C_p = C_p(293K)$

3.2.2. Tipos de aquecimento

Para o sistema de aquecimento da célula até 400K foram propostas três hipóteses:

- Aquecimento resistivo

Uma das opções para o aquecimento do sistema foi utilizar fio de aquecimento Constantan enrolado em volta da célula de adsorção. Ao passar uma corrente neste fio, devido ao efeito de Joule, irá dissipar potência o que leva ao seu aquecimento. O fio de Constantan é constituído por cobre e níquel, a sua resistividade é quase constante entre 77 K a 500 K e não oxida em contacto com o ar. O possível problema é se ao longo dos ciclos, ao mergulhar o fio em azoto líquido e retirar-se, não causará danos ao fio de aquecimento.

- Radiação

Outra hipótese ponderada para o aquecimento do sistema de envelhecimento foi a construção de um forno por radiação. Em primeira aproximação foi assumida uma altura do forno (L_2) igual à altura da célula (L_1) e o raio do forno (r_2) o dobro do raio da célula (r_1), como é apresentado na figura 3.7. Esta hipótese foi posta de parte porque com o dimensionamento feito para este forno, cuja temperatura foi limitada a 600°C, chegou-se à conclusão que o tempo que a célula demoraria para chegar à temperatura desejada era muito longo. Uma outra solução teria sido o aquecimento utilizando, como fonte de aquecimento, lâmpadas de halogénio. Mas a montagem seria muito mais complexa que a solução proposta a seguir.

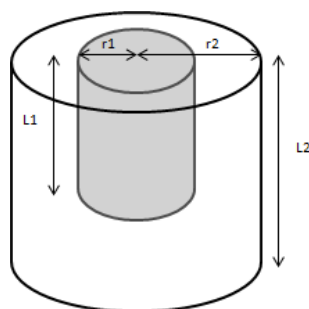


Figura 3.7: Esquema das dimensões do forno de radiação.

As dimensões do forno de radiação são $L_2 = 2\text{cm}$ e $r_2 = 2\text{cm}$ e da célula são $L_1 = 2\text{cm}$ e $r_1 = 1\text{cm}$.

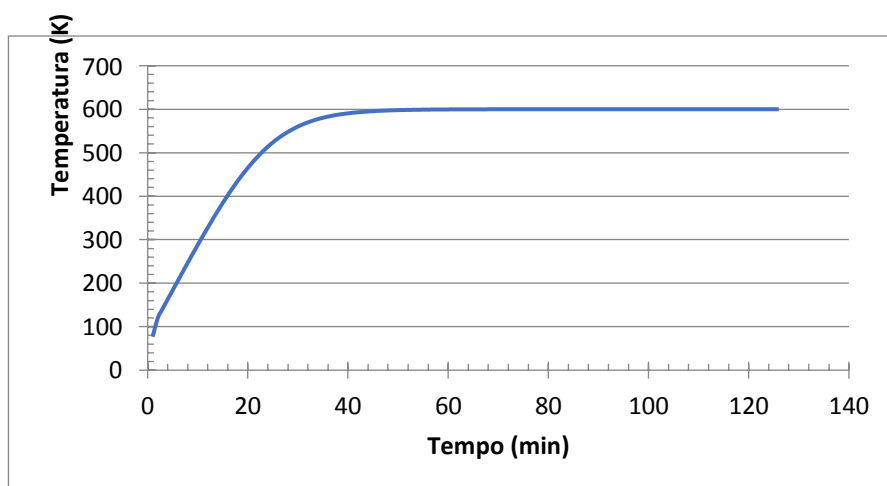


Figura 3.8: Tempo de aquecimento da célula.

- Aquecimento por indução

A hipótese escolhida para o aquecimento foi o sistema de aquecimento de indução (fig.3.9). Este tipo de sistema está disponível no mercado a um preço relativamente baixo (menos de 40 euros), com dimensões apropriadas à nossa montagem. O carácter metálico da célula (cobre ou aço inoxidável) permite este tipo de aquecimento com uma boa eficiência. O aquecimento escolhido permite dissipar um máximo de 1000 W (48 V/ 20 A).

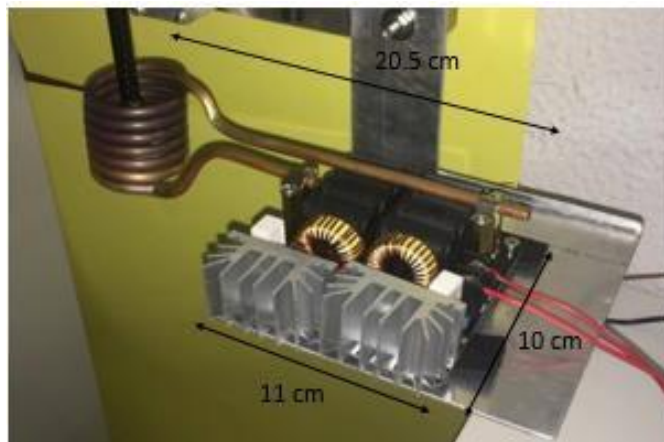


Figura 3.9: Aquecimento por indução.

3.3. Atuador linear

Para o movimento vertical da célula de adsorção do aquecimento para o arrefecimento, deu-se preferência a um sistema linear *"home made"* (fig.3.10). Este sistema foi desenhado em SolidWorks™, tendo em conta o peso total que é necessário fazer subir e descer (célula de adsorção, sensor de pressão, capilar de ligação da célula, carro) e o deslocamento da célula desde do fundo do dewar até ao aquecimento.

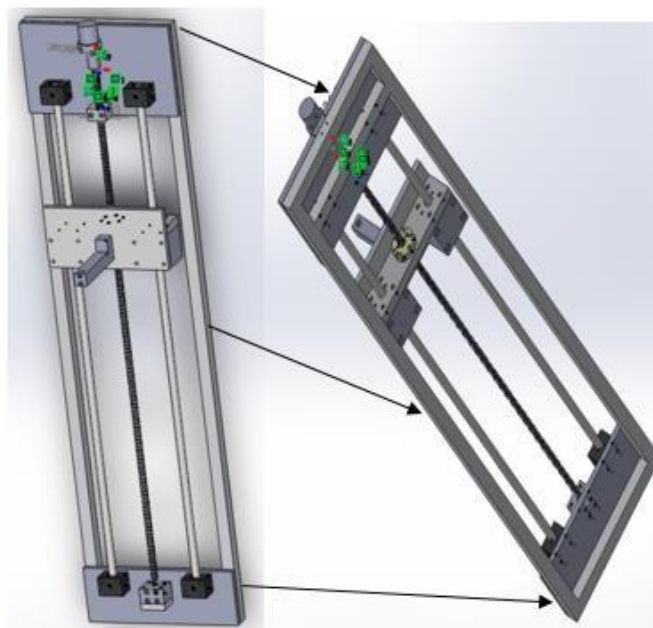


Figura 3.10: Ilustração do atuador linear desenhado em SolidWorks™

O movimento do carro que transporta a célula de adsorção e o sensor de pressão é feito ao longo de um fuso sem fim trapezoidal de 2 mm de passo e 10 mm de diâmetro e de dois veio em alumínio de 12 mm de diâmetro com as funções de minimizar as vibrações e fazer de guias durante o transporte (fig.3.11).

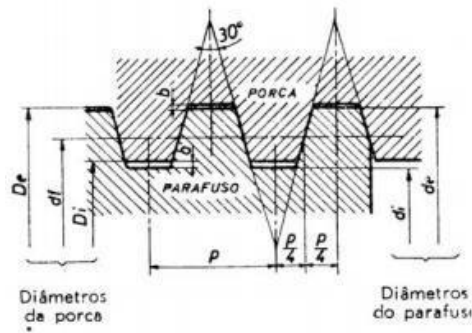


Figura 3.11: Ilustração do fuso e elementos dimensionais da porca [18].

O carro é composto por duas guias, uma porca trapezoidal com as mesmas especificações que o fuso sem fim e uma plataforma onde se anexa o apoio do capilar de fibra de carbono e o sensor de pressão. Estes componentes serão fixados numa estrutura com duas chapas nas extremidades (fig. 3.12).

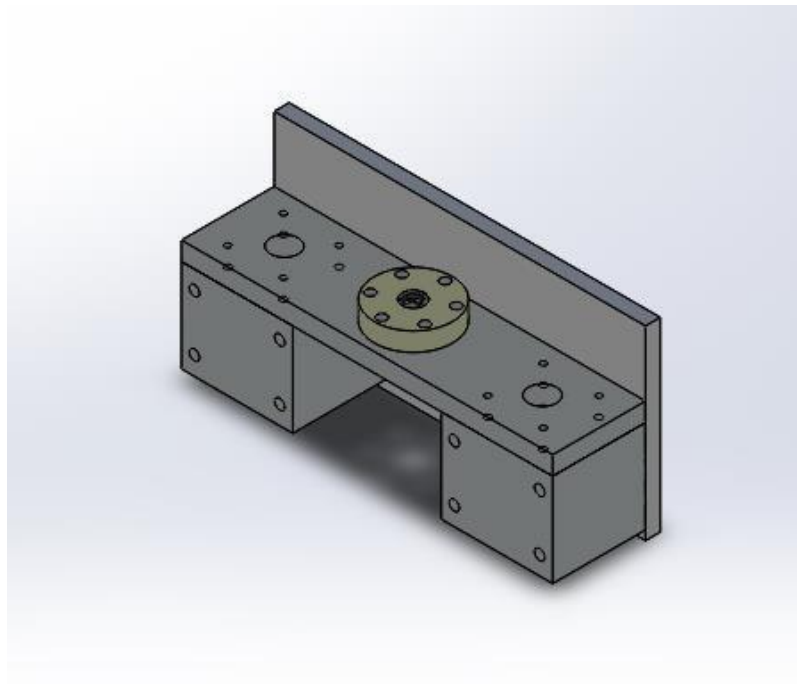


Figura 3.12: Ilustração do carro- dimensionado.

Com a escolha destes componentes, foi necessário fazer um dimensionamento para o motor de forma a suportar o peso do conjunto que se movimenta e que aguento com as paragens repentinas do aquecimento/arrefecimento, mudanças de sentido de rotação durante um longo número de ciclos (tabela 3.1).

Como num sistema linear não existem forças de deflexão ou de torsão, então o que é necessário ter em conta são as forças a nível axial. Sendo então necessário ter em conta o torque de atrito entre a porca e o fuso sem fim [18].

O torque aplicado para vencer a gravidade e é dado por:

$$T_a = \frac{d_m(\pi\mu d_m \sec(\alpha) + l)}{2(\pi d_m - \mu l \sec(\alpha))} \quad (3.11)$$

Em que d_m é o diâmetro médio do fuso, l é o passo, μ é o fator de atrito e α é o ângulo da rosca e F o peso da massa a transportar.

O torque da inércia do fuso é dado por:

$$T_i = \frac{\partial \omega}{\partial t} I_t \quad (3.12)$$

Em que ω é a velocidade angular do fuso sem fim e I_t momento de inércia total que é dado por:

$$I_t = F \left(\frac{l}{2\pi^2} \right) + I_f \quad (3.13)$$

Utilizando as equações 3.11, 3.12, 3.13, o torque mínimo necessário para pôr o carro a subir com massa 2.08 kg é de 0.017 N.m. Isto indica que qualquer tipo de motor cumpre com as especificações dimensionadas, então foi escolhido um motor de corrente contínua de 36 V. O motor utilizado neste projeto é um motor de uma impressora.

Massa da célula (kg)	0.058	Massa total (kg)	2.08
Massa do carro (kg)	1.5	Peso (N)	20.34
Massa dos dois rolamentos (kg)	0.018	Velocidade linear (m/s)	0.01
Massa da fibra de carbono (kg)	0.3	Velocidade angular do fuso (rad/s)	43.89
Massa do sensor de pressão (kg)	0.2	Velocidade do fuso (rpm)	419.16
Comprimento do fuso (m)	1	Inércia reflectida de carga (kg*m ²)	2.10343E-07
Pitch do fuso (m)	0.002	Inércia total (kg*m ²)	4.09034E-06
Inércia do fuso (kg*m ²)	3.88E-06	Torque gravidade (N.m)	0.02
Aceleração gravítica (m/s ²)	9.8	Aceleração (m/s ²)	0.07
Distância do forno ao dewar (m)	0.7	Aceleração angular (rad/s ²)	219.47
Tempo da deslocação (s)	60	Torque inércia do fuso (N.m)	8.98E-04
Tempo de aquecimento/arrefecimento (s)	240	Torque atrito (N.m)	0.017
Tempo a velocidade constante (m/s)	50	Trms (N.m)	0.007
Tempo de aceleração (s)	0.2	Potência máxima (W)	0.73
Coeficiente de fricção	0.1	Potência média (W)	0.58
Eficiência do fuso	0.41	Pitch min (mm)	0.008

Tabela 3.1: Folha de cálculo do dimensionamento do motor.

Montagem e controlo

4.1. Mecânica

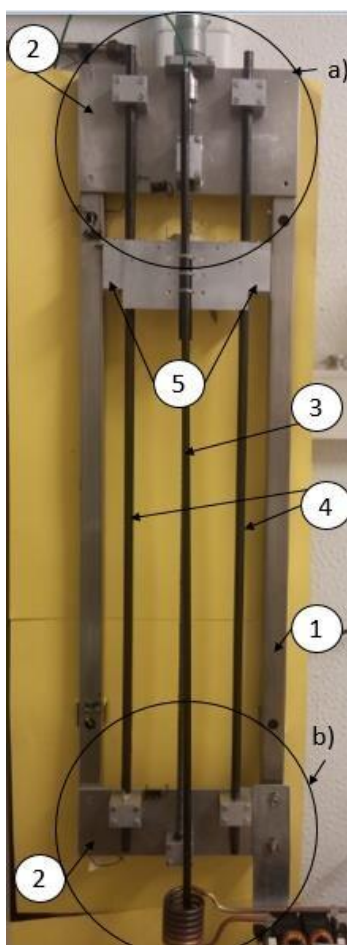


Figura 4.1: Atuador Linear *home made*.

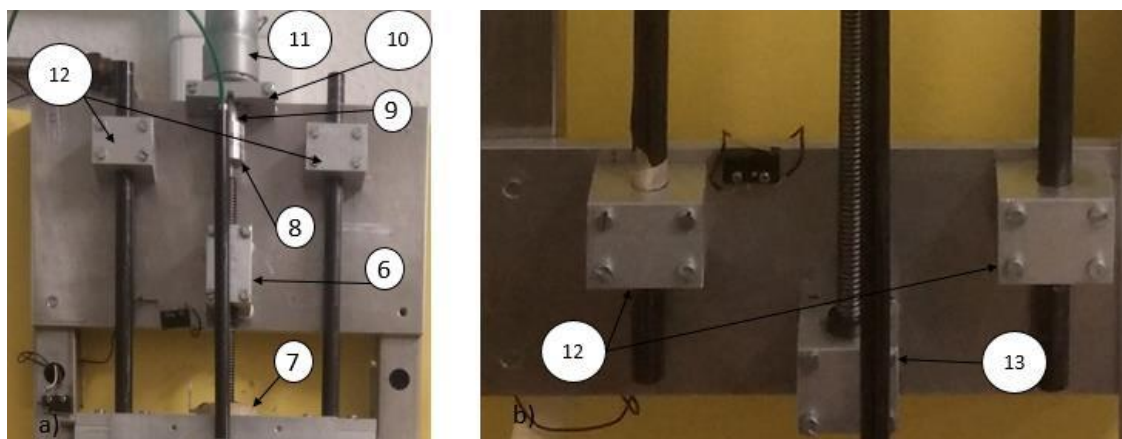


Figura 4.2: Atuador linear a) parte superior b) parte inferior.

A montagem mecânica do sistema de envelhecimento (fig.4.1) é composto por uma estrutura (1) que suporta o atuador linear. Esta estrutura é constituída por perfil de 30 x 30 mm² em aço inox com 1 m de comprimento e 290 mm de largura.

Nas extremidades da estrutura montou-se uma chapa superior (fig.4.2-a) de alumínio onde se fixou o motor, uma guia (6) para o fuso sem fim (3) com o objetivo de diminuir as vibrações do sistema e duas fixações para os veios (12). Na parte inferior da estrutura (fig.4.2-b), montou-se uma chapa (2) do mesmo material onde se fixou duas fixações para os veios (12) e um suporte para o fuso sem fim (13). As chapas foram aparafusadas à estrutura com parafusos M8.

O fuso sem fim (3), em aço inox da marca Igus, tem um comprimento total de 1 m, 10 mm de diâmetro e um passo de 2 mm (fig. 4.3). A guia (6) é composta por um cilindro de teflon grafitado que tem a particularidades de ser auto lubrificante e está inserido num suporte de alumínio de furo passante (13). Este suporte é composto por um bloco de alumínio com furo não passante onde está inserido uma peça de teflon grafitado, sobre a qual o fuso se apoia, que roda com o movimento rotacional do fuso (fig. 4.4). O suporte tem como objetivo que o peso do carro não seja completamente suportado pela sua ligação ao motor.



Figura 4.3: Fuso sem fim trapezoidal com pino [19].

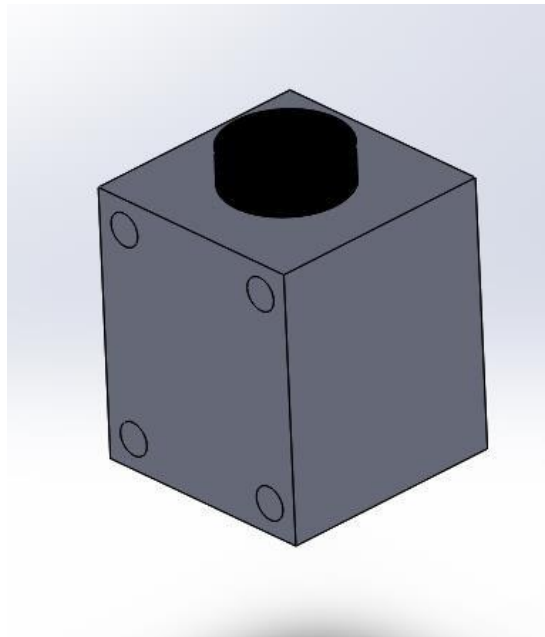


Figura 4.4: Ilustração do apoio do fuso.

Os dois veios (4) em alumínio, com diâmetro de 12 mm e comprimento de 1 m (Iigus), são fixados nas suas extremidades por duas fixações em alumínio com furo passante justo, evitando o movimento das guias.

O carro é constituído por uma porca trapezoidal (7) com o mesmo passo e diâmetro que o fuso da marca Iigus (fig 4.5), duas guias (5) onde percorrem ao longo dos veios. Estas guias contêm um suporte em alumínio onde está inserido um cilindro linear de teflon grafitado (fig. 4.6).



Figura 4.5: Porca trapezoidal drylin da Iigus [20].

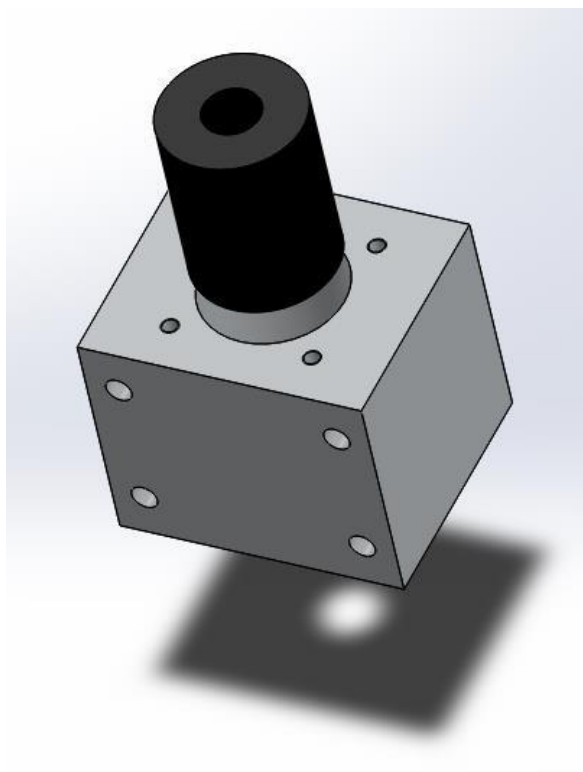


Figura 4.6: Ilustração das guias do carro.

Na secção do motor foi instalado um acoplador (9) para atenuar o desalinhamento entre o fuso sem fim e o veio do motor, este da marca RS. Foi construído um adaptador (10) (fig. 4.7) que encaixa no veio do motor e no acoplador devido à diferença de diâmetros do orifício do acoplador e veio do motor (12) e um suporte para o motor (11).

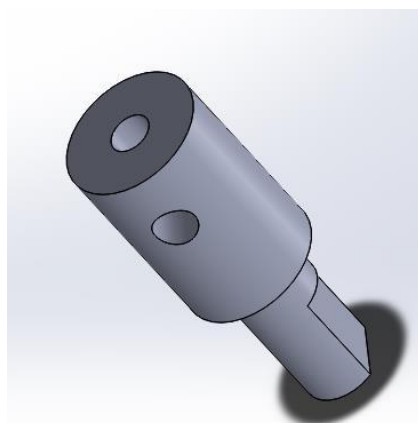


Figura 4.7: Ilustração do adaptador do motor.

4.2. Princípio

O funcionamento do sistema para os ciclos de envelhecimento acelerado do material adsorvente procede da seguinte forma: no início do teste, dependendo da posição do carro, inicializa-se o movimento para cima onde está o aquecimento por indução ou para baixo onde está o *dewar* com azoto líquido.

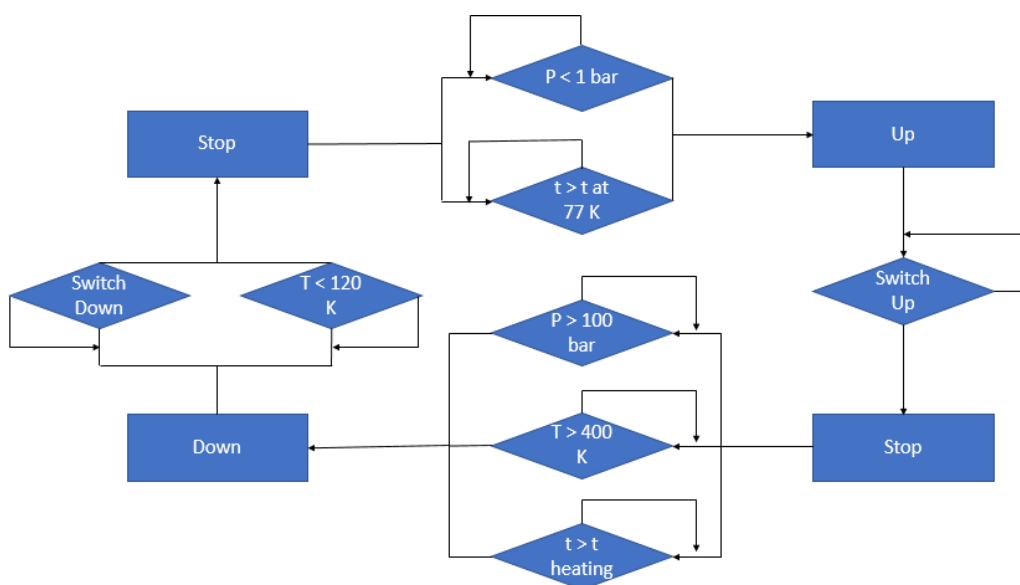


Figura 4.8: Fluxograma do funcionamento dos ciclos.

No sistema foram instalados dois interruptores de fim de curso com a função de parar o movimento do carro, sendo um responsável pela paragem da subida e outro pela paragem da descida. A paragem da descida da célula pode ser feita por dois motivos (fig.4.8): pelo fim de curso ou por temperatura. Quando o sistema está parado na fase de arrefecimento, existem dois parâmetros que permitem o arranque (para subir) do sistema: quando a pressão no interior da célula for menor que uma determinada pressão (adsorção do gás no material adsorvente) ou por tempo. Durante a fase de aquecimento, existem três parâmetros que permitem o re-arranque do sistema para a descida: quando a pressão no interior da célula for maior que uma determinada pressão (quando ocorre a dessorção do gás no material adsorvente), quando a temperatura for superior a uma determinada temperatura ou por tempo.

4.3. Eletrônica do atuador linear

Para executar o funcionamento mencionado no subcapítulo anterior, é necessário um circuito para controlar as paragens do motor para o aquecimento e arrefecimento, as inversões do sentido de rotação do motor e as paragens do carro nos fins de curso. Para tal, utilizou-se o microcontrolador Arduíno Uno. Os fins de curso estão ligados às portas digitais do Arduíno 3 e 5. Quando o carro não está a carregar no interruptor, o Arduíno recebe na porta digital 0 V. Caso contrário, a porta digital do Arduíno recebe 5 V. Ao receber este sinal, as portas digitais responsáveis pela rotação do motor serão fechadas e o motor deixa de funcionar. Os interruptores de fim curso que estão ligados ao Arduíno estão ligados em série com uma resistência de 10 k Ω para que a queda de tensão seja total.

As portas digitais 11 e 9 são ligadas ao circuito integrado L298N, cuja funcionalidade será explicada mais à frente, e por sua vez ligado ao motor. Estas portas são responsáveis pelo sentido de rotação do motor, quando a porta 11 recebe 5 V, o veio do motor tem uma rotação num sentido correspondendo à subida do carro, quando a porta 9 recebe os 5 V o veio do motor tem uma rotação oposta. Dois LED estão ligados em paralelo com as portas digitais para indicar o sentido do movimento: o LED azul corresponde à subida e o LED vermelho corresponde à descida.

Em cada terminal do motor estão ligados dois díodos (4 díodos no total) que são denominados *ponte H* que têm a função de proteger a fonte de alimentação quando o motor arranca/pára ou inverte o seu movimento, pois ocorrem picos de tensão que são recebidos pela fonte de tensão, podendo danificá-la. Estes díodos devem ser dimensionados com cuidado porque com a carga que o motor tem que suportar ao fazer subir/descer o conjunto, o motor tem tendência para puxar muita corrente (neste caso na ordem dos 1.2 A). Os díodos escolhidos foram os 1N5401 de 100 V de tensão e 3 A de corrente.

Os outros dois fins de curso e o interruptor, que estão ligados em série com a entrada de 3.3 V do Arduino e ligados ao pin *enable* do circuito integrado L298N, são interruptores de emergência, isto é, se eventualmente os fins de curso ligados ao Arduino danificarem, estes dois fins de curso irão desligar o circuito integrado cortando a alimentação do motor.

Num dos terminais do motor foi instalado um circuito complementar para regulação de tensão (será explicado o seu funcionamento mais à frente) com o objetivo de limitar a tensão quando a célula está a movimentar para o *dewar* de forma a diminuir vibrações e ruído do sistema mecânico, igualar os tempos de subida e descida e se necessário aumentar a tensão ao motor para levantar peso mais elevado terá sempre a mesma tensão na descida.

Os condensadores são utilizados para atenuar as variações de tensão que possam ocorrer.

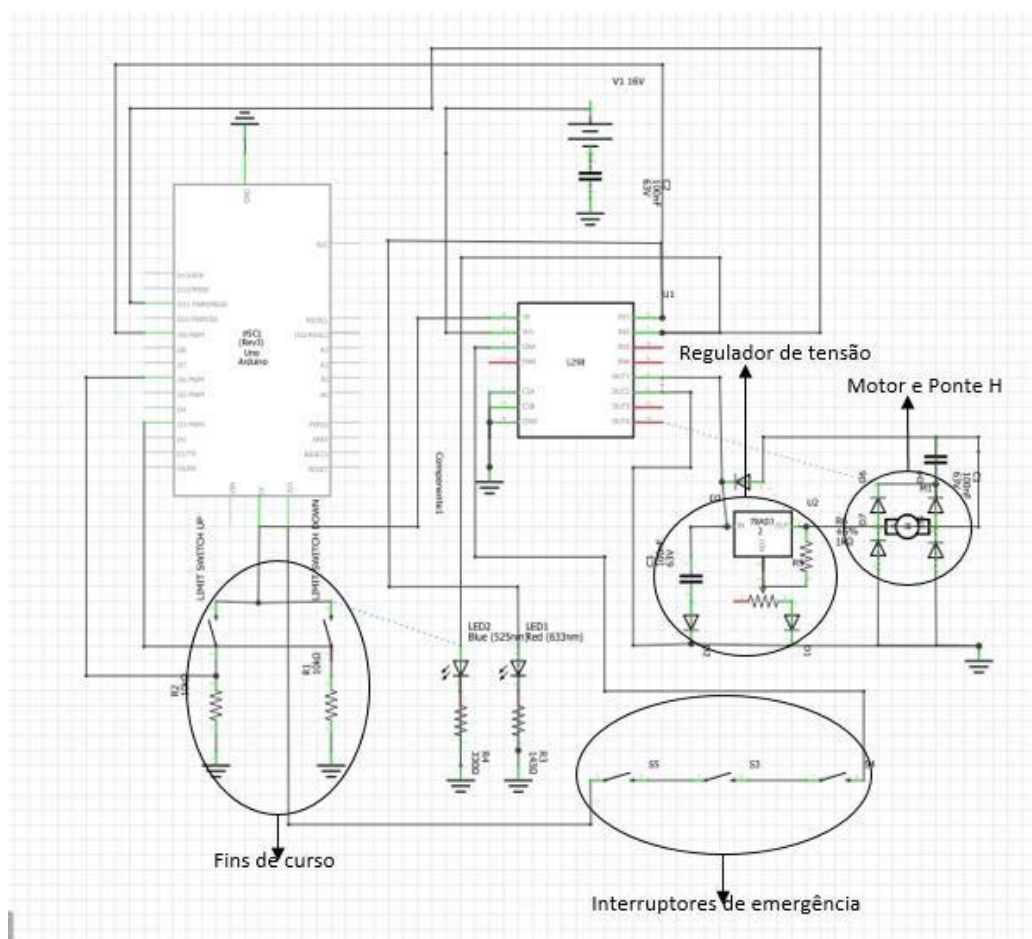


Figura 4.9: Esquemático do circuito do atuador linear.



Figura 4.10: Circuito do atuador linear.

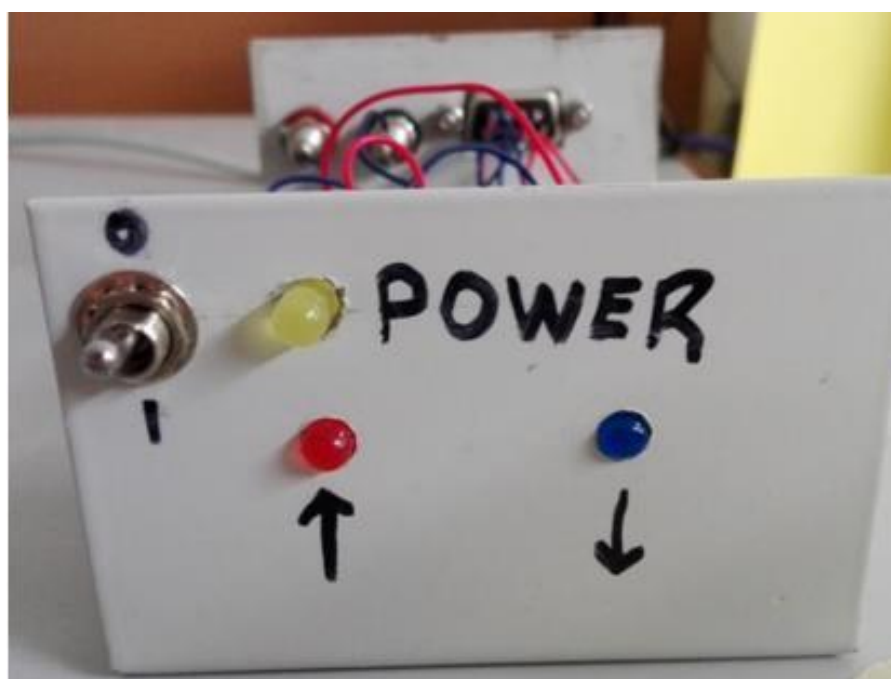


Figura 4.11: Caixa do circuito.

4.4. L298N

O circuito integrado L298N é o componente eletrônico principal deste circuito (fig. 4.12). É o componente responsável pelas inversões de sentido do motor e o mesmo faz com que a alimentação do motor esteja desacoplada com as entradas digitais do Arduino, pois estas portas suportam o máximo de tensão de 5V. Isto acontece devido à conversão do sinal vindo da alimentação do motor em sinal PWM de 5 V para as portas digitais. O L298N suporta dois motores em simultâneo, mas para este projeto basta a ligação de um motor.

Os terminais do motor são ligados ao pin 2 e 3 (OUT1 e OUT2) e a inversão de sentido de rotação do motor deve-se às trocas de polarização, isto é, trocas de sentido da corrente que passa pelo motor.

A alimentação que é fornecida ao motor é ligada ao pin 5 (Vcc). O pin 4 (Vc) é a alimentação digital de 5 V proveniente do Arduino. O pin 6 (Enable) tem como função ligar ou desligar o circuito integrado, se neste pin não receber tensão o motor não recebe qualquer alimentação. Os pins 5 e 7 (IN1 e IN2) são ligados às entradas digitais 11 e 9. O circuito integrado manda o sinal ao Arduino para que sentido é que o motor funciona. Os pins 1 e 15 estão ligados à terra, pois servem para monitorizar a corrente que passa no L298N. Os restantes pins não estão ligados. O L298N, por defeito, ocorre uma queda de tensão nos terminais do motor relativamente com a tensão da fonte de alimentação na ordem dos 3 V para uma corrente na ordem do 1 A.

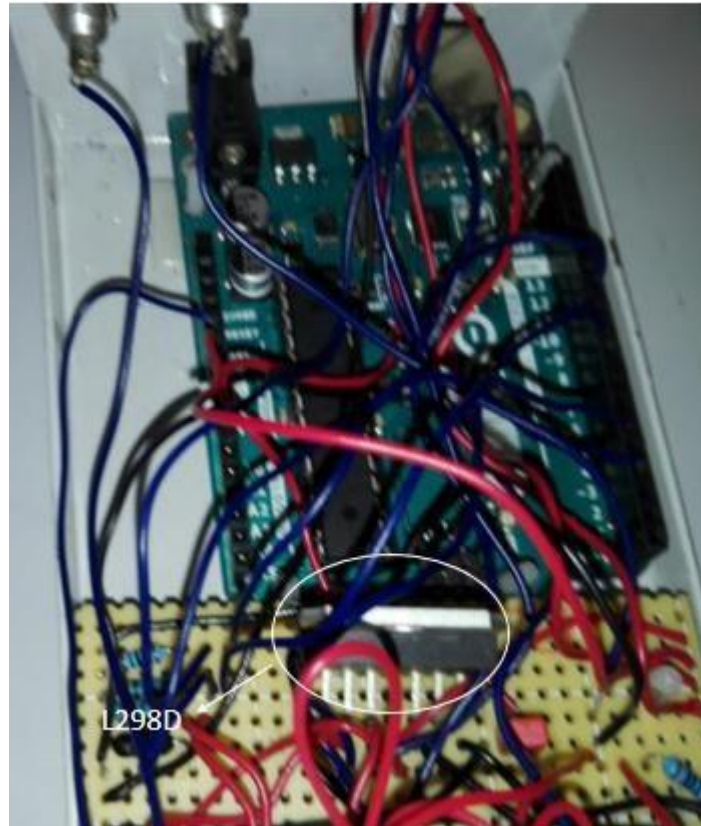


Figura 4.12: Circuito integrado L298N.

4.1. Regulador de tensão

No circuito principal foi implementado um circuito complementar para permitir que a tensão aplicada ao motor seja mais pequena durante a descida (Fig 4.15 a)) do que durante a subida do carro (Fig 4.15 b)). Estes valores foram determinados experimentalmente para permitir uma subida e descida sem vibrações do fuso mas com velocidades compatíveis com os nossos requisitos. O circuito integrado utilizado para este papel é o LM 317.

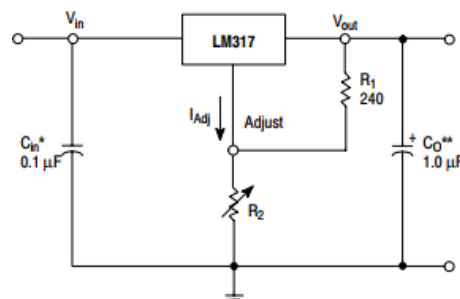


Figura 4.13: Esquemático do circuito de regulação de tensão.

Este tipo de circuitos integrados (CI) são reguladores ajustáveis, isto é, de acordo com o dimensionamento das resistências R1 e R2 define-se a tensão output que queremos. A expressão para dimensionar as resistências para uma tensão de saída 11.5 V é dado por:

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) + I_{adj}R2 \quad (4.1)$$

Em que V_{ref} é a tensão de referência do LM317 que é 1.25 V e I_{adj} é a corrente típica do pin *adjust* do CI que é na ordem dos 50 μ A.



Figura 4.14: Regulador de tensão.

Neste circuito a resistência R2 é um potenciômetro de 10 k Ω . Para os testes que foram realizados a tensão output para a descida do carro foi de 11.5 V e a tensão de alimentação é de 16 V (com a queda de tensão proveniente do L298N resulta uma tensão de entrada de 12.8 V).

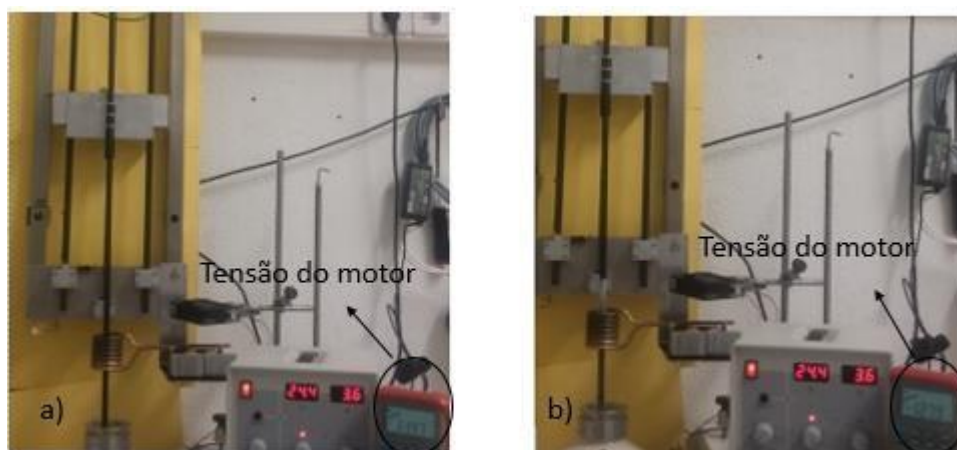


Figura 4.15: Tensão nos terminais do motor: a) quando desce b) quando sobe.

4.2. LabVIEW™

A interface do programa de controlo (fig 4.16) e comunicação para o sistema de envelhecimento (fig 4.17) foi desenvolvido no LabVIEW™.

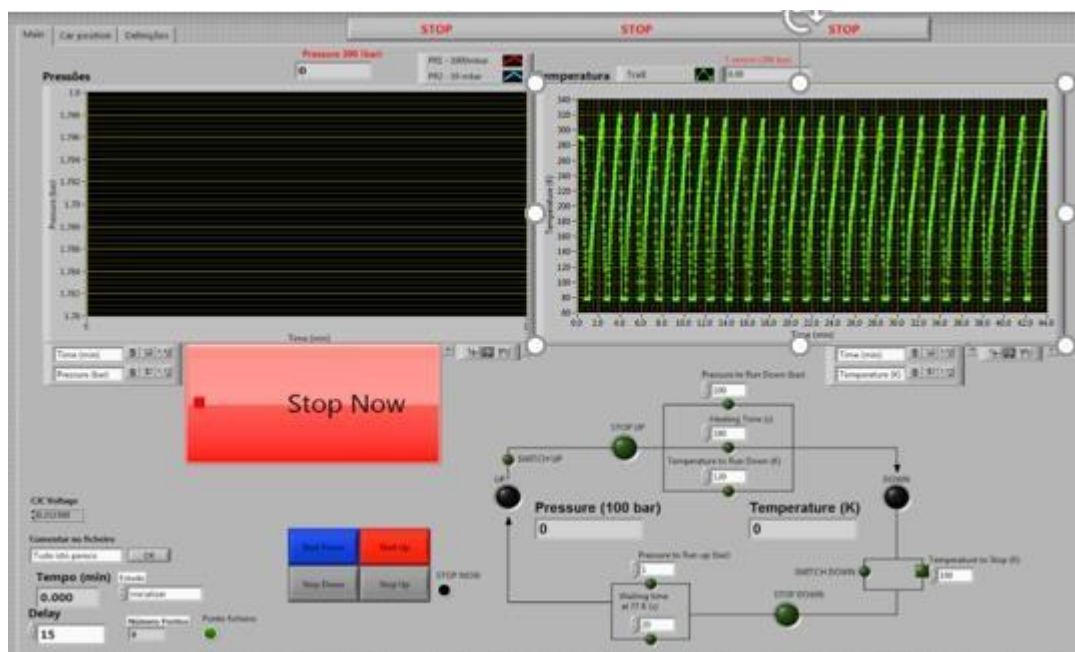


Figura 4.16: Interface do programa de controlo em LabVIEW™

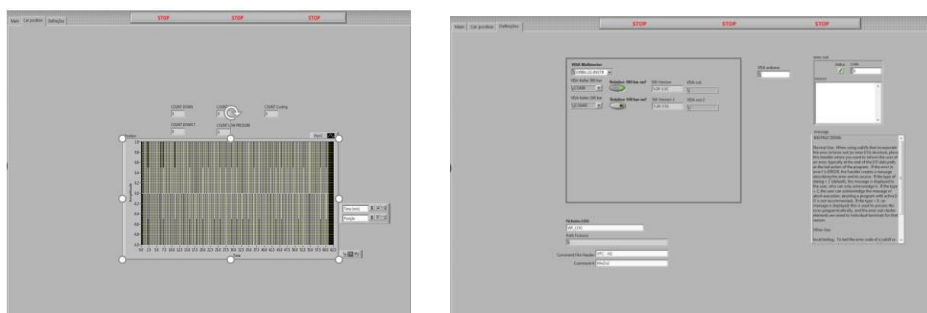


Figura 4.17: Interface da posição do carro e portas séries dos equipamentos em LabVIEW™

O programa tem como funcionalidade a visualização em tempo real da temperatura lida no termopar tipo K inserido na célula de teste, da pressão lida no sensor de pressão (nesta dissertação não houve medições de pressão, pois o mesmo não foi instalado, mas o algoritmo para a leitura e visualização na interface foram desenvolvidos), leitura e visualização do número de paragens do carro no aquecimento e no arrefecimento, dando assim o número de ciclos, um ficheiro de output com todos os parâmetros mencionados e o tempo que demora a registar cada ponto no ficheiro. Permite também ajustar vários parâmetros como as pressões ou as temperaturas às quais queremos parar/rearrancar o movimento (Fig 4.7) e os tempos máximos de espera na posição baixa ou alta.

Foi também desenvolvido um programa no Arduino de forma a fazer a comunicação com o LabView, isto é, quando o Arduino recebe um comando do LabVIEWTM este executa uma ação como, por exemplo, o arranque do motor (subida ou descida), as paragens ou a leitura do estado dos fins de curso. Quando deixa de haver informação na porta série, o programa é interrompido.

Quando o sistema está em funcionamento, o LabVIEWTM e o Arduino estão em constante comunicação, apesar de o controlo ser responsabilidade do programa, foi necessário ajustar os *timings* de envio e ressecção entre o Arduino e o LabVIEWTM devido a erros de expiração de tempo na ressecção de informação da porta série proveniente do Arduino sucedidos no LabVIEWTM. Então definiu-se uma taxa de amostragem no Arduino de 250 amostragens/s.

No quadrante inferior direito da interface gráfica está apresentado um esquema com Led's que indicam a ação que está a ser executada no carro e quando a célula atinge algum dos parâmetros de arranque do motor durante o aquecimento ou arrefecimento. Estes parâmetros são todos ajustáveis.

Também existem comandos para controlo manual. No lado esquerdo do esquema mencionado existe quatro botões: um para subir ("Start Up"), para descer ("Start Down"), para parar quando o carro está a subir ("Stop Up") e parar quando o carro está a descer ("Stop Down"). Também tem um botão de emergência ("STOP NOW") que ao ser carregado, o sistema pára e só o utilizador é que o pode recomeçar.

A figura 4.16 representa a visualização dos ciclos de posição do carro. No gráfico quando o carro está em movimento assinala o valor 0 (não importa o sentido). Quando ocorre a paragem no aquecimento assinala o valor 1. Quando ocorre a paragem no arrefecimento por temperatura assinala o valor -0.5 e quando ocorre a paragem no arrefecimento efetuada pelo fim de curso assinala o valor -1.

Na figura 4.17 pode observar-se vários parâmetros como o estado do Arduíno, as portas séries do multímetro, o sensor de pressão e o nome do ficheiro.



Resultados e Discussão

5.1. Testes mecânicos e térmicos

Para verificar a viabilidade do sistema linear, foi aplicado o primeiro teste mecânico. Neste teste, não se utilizou o programa LabVIEW™, só o Arduíno e o circuito. Para este teste escreveu-se um programa no Arduíno com as funcionalidades de quando o carro chegava ao fim de curso, parava e ao fim de 5 segundos invertia o seu sentido de marcha. Este teste teve uma duração de 3 horas e foi nenhum problema foi observado.

Nos testes seguintes, instalou-se um tubo de fibra de carbono (como não é metálico não aquece) e um modelo de teste da célula no carro. Este modelo de teste utilizado foi um “fiting VCR” de ¼” de aço inoxidável representativo do que poderia ser a célula no futuro. Ainda se instalou o aquecedor de indução no sistema.

No primeiro teste térmico, o termopar estava desacoplado da célula de modo a testar a paragem da célula quando este tocar o azoto líquido. Para tal, estipulou-se como parâmetro de paragem uma temperatura de 200 K. O tempo de arrefecimento foi de 10 segundos. Os parâmetros de arranque no aquecimento foram definidos para o tempo de 180 segundos e temperatura de 300 K. A figura 5.1 representa estes resultados, a linha azul representa a temperatura em função do tempo e a linha laranja é o número de paragens.

Na figura 5.1, pode parecer em alguns ciclos que o termopar não chegou aos 300 K. Na realidade, o termopar tocou no LN2 mas devido a um tempo de registo no ficheiro mais curto que a dinâmica térmica do sistema, os pontos correspondentes não foram registados. O teste teve uma duração de 43 minutos.

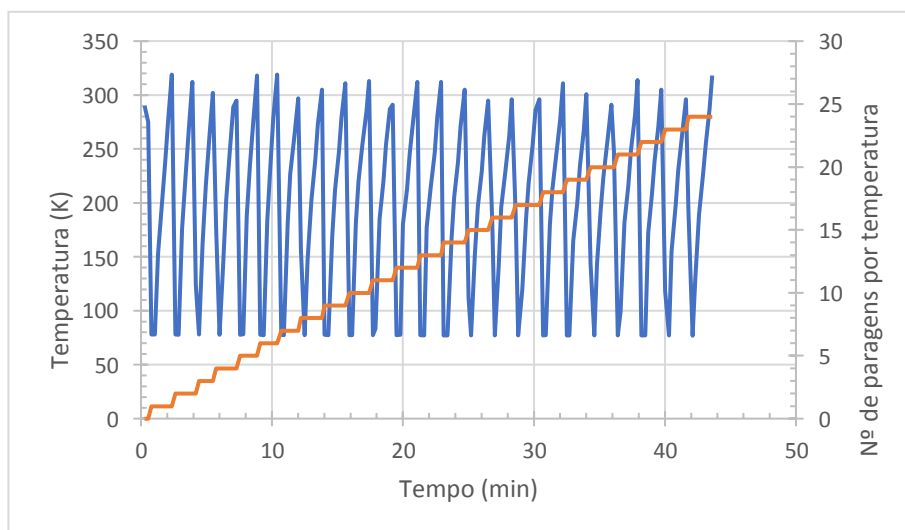


Figura 5.1: Gráfico do primeiro teste térmico em função do tempo.

No segundo teste, o termopar foi acoplado à célula para se estudar o tempo dos ciclos. Durante os primeiros ciclos ajustou-se o tempo de arrefecimento de forma a atingir os 77 K, até que se definiu o tempo de 80 segundos. Até aos 40 minutos de funcionamento, os parâmetros de temperatura e tempo no aquecimento foram definidos para 300 K e 300 segundos, respetivamente. O tempo de um ciclo é aproximadamente 3 minutos.

Depois de 40 minutos, foram alterados os parâmetros de temperatura no aquecimento e tempo arrefecimento para 400 K e 100 segundos, respetivamente. O tempo de um ciclo neste estágio é de 4 minutos. A duração do teste foi de 140 minutos.

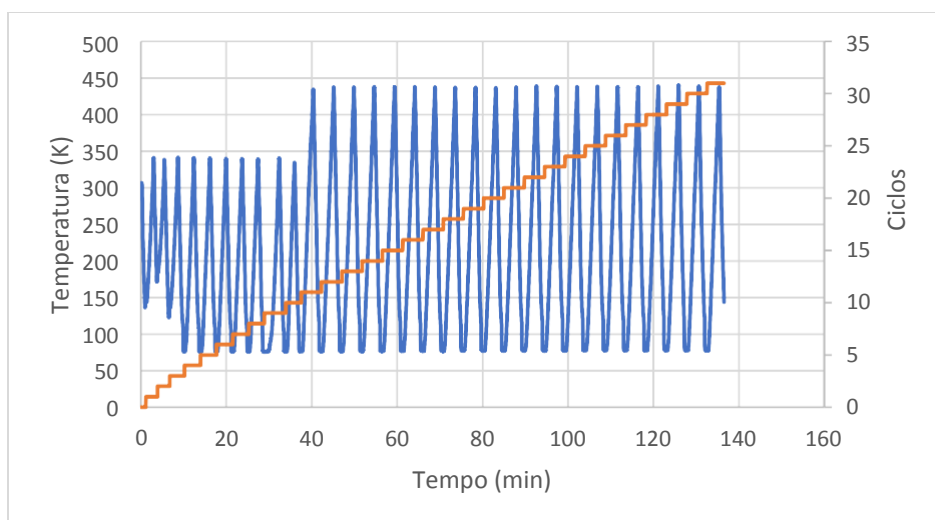


Figura 5.2: Gráfico do segundo teste em função do tempo.

O último teste definiu-se as mesmas condições e parâmetros que o teste anterior mencionado, mas com uma duração de funcionamento de 43 minutos.

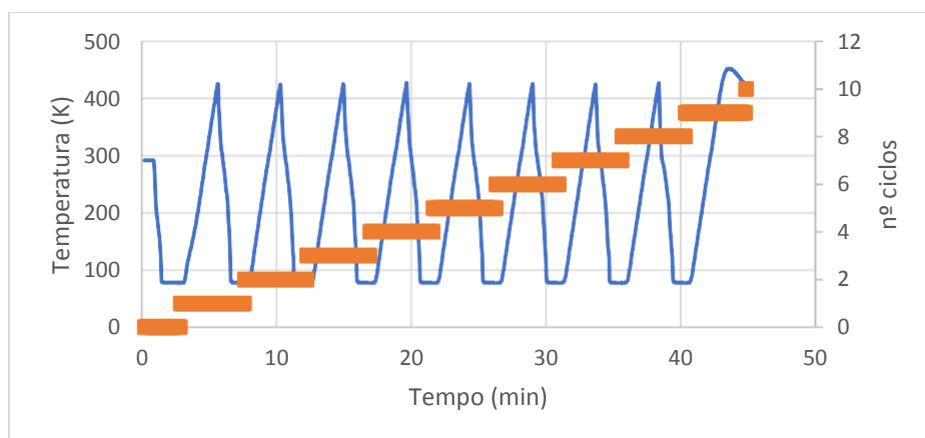


Figura 5.3: Gráfico do terceiro teste em função do tempo.

A tensão fornecida ao aquecedor de indução é de 24.5 V, a corrente quando a célula está inserida na bobina é de 6.7 A. Quando a célula está a ser transportada ou no arrefecimento a corrente é de apenas 3.6 A.

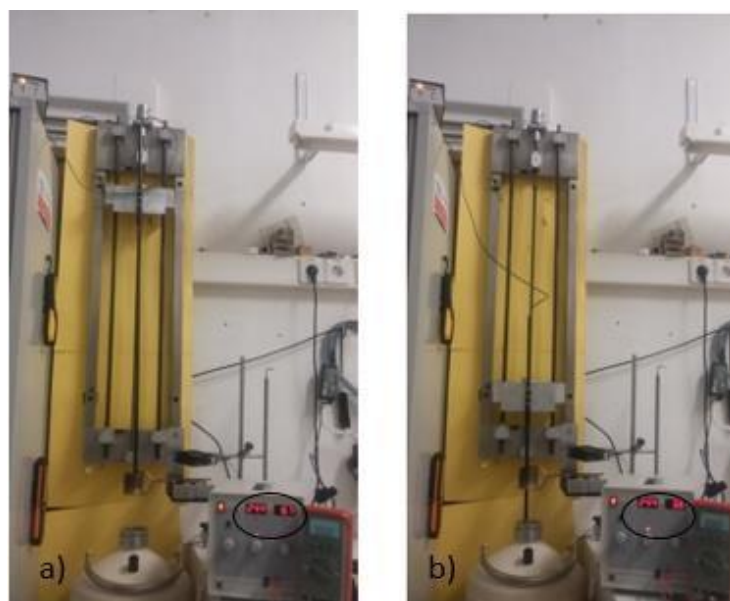


Figura 5.4: Corrente e tensão no aquecedor de indução a) no aquecimento b) no arrefecimento.

A duração dos testes não foi mais prolongada e houve interrupções em alguns testes devido a um problema com o computador em utilização para este sistema que como entra, às vezes, em conflito com as drivers da porta série onde se estabelece a comunicação com o Arduino. Este problema conduzia a um erro do computador que o levava a encerrar.

6

Conclusões

O sistema de envelhecimento acelerado a nível da parte mecânica e da parte térmica na gama de 77 K a 400 K foi concluído com sucesso. Este sistema, poderá futuramente simular o número de ciclos a que o material adsorvente irá ser sujeito durante o funcionamento do criorefrigerador, embora num tempo mais curto, de forma a estudar a degradação eventual das propriedades de adsorção.

Durante o tempo da execução deste projeto foi dimensionado o sistema mecânico e térmico, efetuada a montagem do sistema mecânico, o dimensionamento do circuito, a montagem do circuito, o dimensionamento da célula e a programação do controlo e comunicação com o sistema.

No futuro, pretende-se instalar a plataforma (já desenhada) no carro com o sensor de pressão e o adaptador para conectar o capilar entre o sensor de pressão e a célula. Será também necessário construir uma célula de adsorção para efetuar os testes de envelhecimento nos materiais adsorventes. Está prevista a utilização de um termómetro no topo da célula para a paragem quando atinge o nível do azoto líquido, pois os resultados dos testes efetuados com o termopar desacoplado da célula foram bem sucedidos.

A nível do aquecimento pretende-se utilizar uma fonte de alimentação de maior potência de modo a aquecer a célula à temperatura desejada num tempo menor. A implementação de um relé permitirá controlar o aquecedor de indução através do arduino.

Referências

- [1] M. Baeta, "Development of a cold stage for a 80 K vibration-free cooler," Universidade Nova de Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologias, 2016.
- [2] G. F. M. Wiegerinck, J. F. Burger, H. J. Holland, E. Hondebrink, H. J. M. Ter Brake, and H. Rogalla, "A sorption compressor with a single sorber bed for use with a Linde-Hampson cold stage," *Cryogenics (Guildf.)*, vol. 46, no. 1, pp. 9–20, 2006.
- [3] R. Radebaugh, "Cryocoolers: the state of the art and recent.," *J. Phys. Condens. Matter* 21, 2009.
- [4] K. Gregg, S. J., & S.W. Sing, *Adsorption, surface area, and porosity*. London: Academic Press., 1982.
- [5] J. Burger *et al.*, "Vibration-free 5 K sorption cooler for ESA's Darwin mission," *Eur. Sp. Agency, (Special Publ. ESA SP)*, vol. 42, no. 539, pp. 379–384, 2003.
- [6] J. Keller and R. Staudt, *Gas adsorption equilibria - Experimental methods and adsorption isotherms*. 2005.
- [7] H. Marsh and F. Rodríguez-Reinoso, *Characterization of Activated Carbon*, no. 1. 2006.
- [8] A. Rezk, R. Al-Dadah, S. Mahmoud, and A. Elsayed, "Characterisation of metal organic frameworks for adsorption cooling," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 55, no. 25–26, pp. 7366–7374, 2012.
- [9] A. G. O. e I. D. W. S. S.-Y. Chui, S. M.-F. Lo, J. P. H. Charmant, "A Chemically Functionalizable Nanoporous Material [Cu₃(TMA)₂(H₂O)₃]_n," *Science (80-.)*, vol. 283, pp. 1148–1150, 1999.
- [10] W. Weibull, *Fatigue Testing and Analysis Results*. Oxford, Paris, New York, London: Pergamon Press, 1961.
- [11] P. W. D. Pearson *, R. Bowman, M. Prina, "The Planck Sorption Cooler: Using Metal Hydrides to Produce 20 K," *J. Alloys Compd.*, vol. 446–447, pp. 718–722, 2007.
- [12] D. Pearson *et al.*, "Flight Acceptance Testing of the Two JPL Planck Sorption Coolers," *Proc. 14th Int. Cryocooler Conf.*, pp. 1–8, 2007.
- [13] L. Duband, L. Clerc, E. Ercolani, L. Guillemet, and R. Vallcorba, "Herschel flight models sorption coolers," *Cryogenics (Guildf.)*, vol. 48, no. 3–4, pp. 95–105, 2008.
- [14] "RS Linear Actuator." [Online]. Available: <http://uk.rs-online.com/web/p/electric-linear-actuators/0228655/>. [Accessed: 07-Feb-2017].

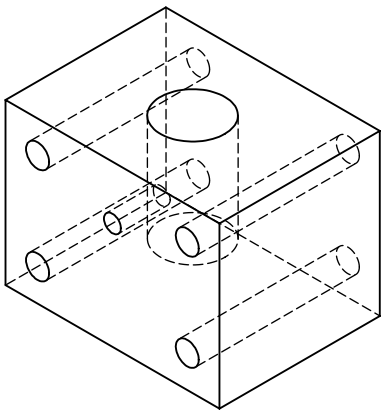
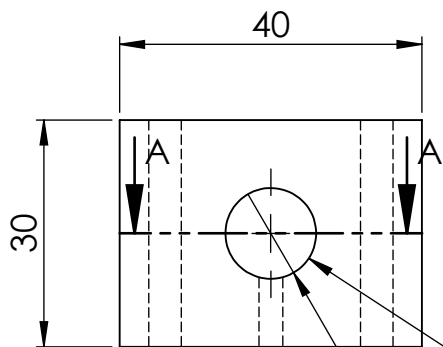
- [15] M. Xavier, "Development of a system for adsorption measurements in the 77 – 500 K and 1 – 100 bar range," Universidade Nova de Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologias, 2016.
- [16] "NIST." [Online]. Available: [http://www.cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/material properties.htm](http://www.cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/material%20properties.htm). [Accessed: 07-Feb-2017].
- [17] E. Touloukian, Y., & Buyco, *SPECIFIC HEAT Metallic Elements and Alloys*. New York: IFI/PLENUM, 1970.
- [18] A. Jos and A. M. Martinho, *Órgãos de máquinas i*. Monte da Caparica, 2012.
- [19] "Igus fuso sem fim." [Online]. Available: http://www.igus.pt/wpck/8319/Trapezoidal_threaded_spindle_with_tap. [Accessed: 23-Aug-2017].
- [20] "Igus porca trapezoidal." [Online]. Available: http://www.igus.pt/wpck/2373/DryLin_Trapezgewindemutter_WFRM. [Accessed: 23-Aug-2017].



Anexos

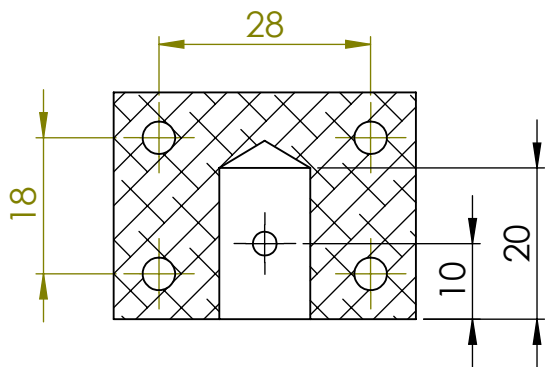
Nos anexos estão os desenhos técnicos desenvolvidos ao longo deste projeto e os data sheet (só o mais importante) utilizado no circuito.

Nota: São 2 peças.



Isometric View
Scale 1:1

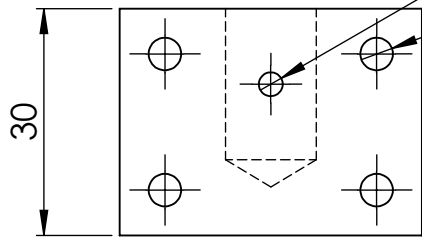
Deslizante justo H7-h6 com veio



SECTION A-A

$\phi 3.2$ (FURO PARA M3
x 0.5 HECICOIL)
FURO ATÈ CHEGAR AO FURO PARA O VEIO

4 x $\phi 4,30$ THRU ALL



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	D.S		30-03-17
CHK'D	G.B		30-03-17
APPV'D			
MFG			
Q.A			

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

Alumínio

TITLE:

Suporte fuso inferior

DWG NO.

Sistema linear 1

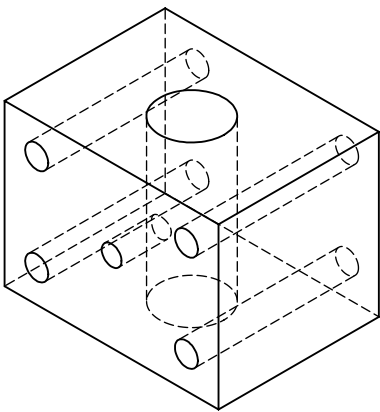
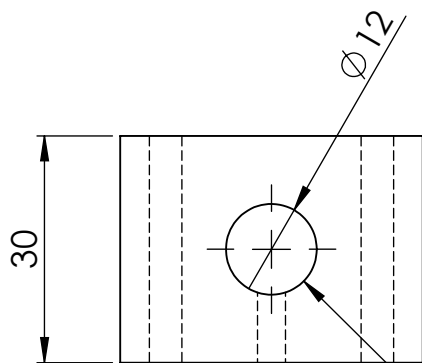
A4

WEIGHT:

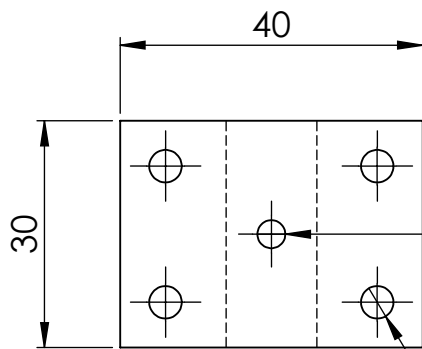
SCALE:1:1

SHEET 2 OF 4

Nota: São 2 peças.



Isometric View
Scale 1:1



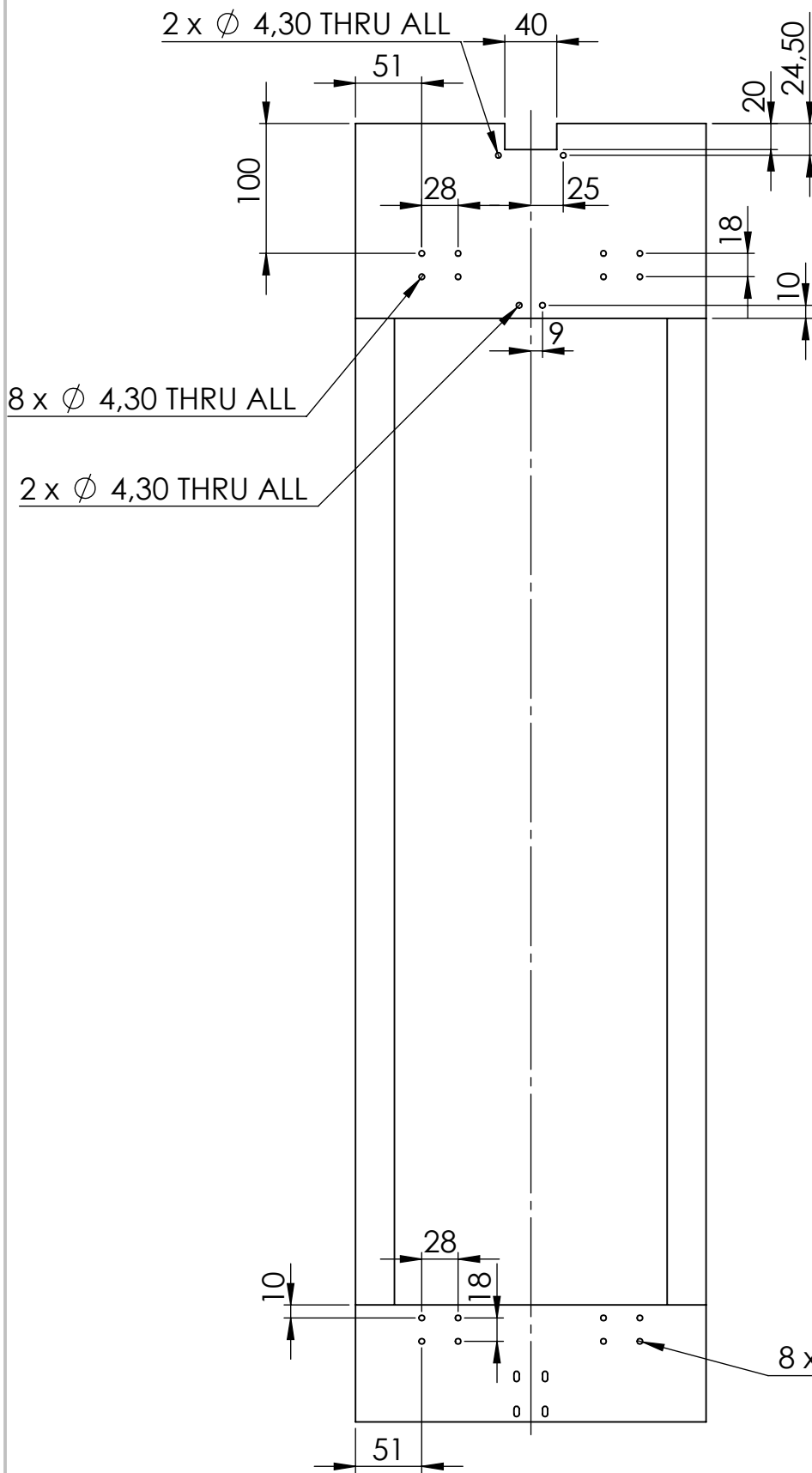
Deslizamento justo H7-h6 com veio



Ø 3.2 (FURO PARA M3 x 0.5 HELICOIL)
FURO ATÈ CHEGAR AO FURO PARA VEIO

4 x Ø 4,30 THRU ALL

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN D.S		SIGNATURE		DATE 30-03-17		TITLE: Suporte veio superior			
CHK'D G.B				30-03-17		DWG NO. Sistema linear 1			
APPV'D						A4			
MFG						SHEET 3 OF 4			
Q.A						SCALE:1:1			
						WEIGHT:			
						SHEET 3 OF 4			



Isometric View
Scale 1:10

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN D.S.		SIGNATURE		DATE 27-04-17		<p>TITLE:</p> <h1>Sistema linear</h1>			
CHK'D G.B.				27-04-17					
APPV'D									
MFG									
Q.A.						DWG NO.		A4	
						SCALE:1:5		SHEET 4 OF 4	

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

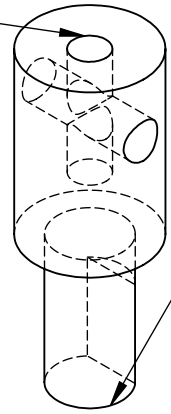
Alumínio

Estrutura

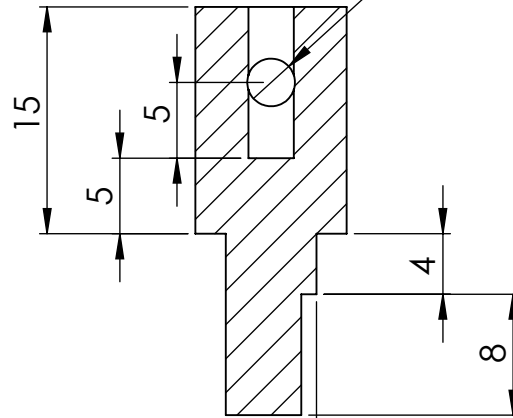
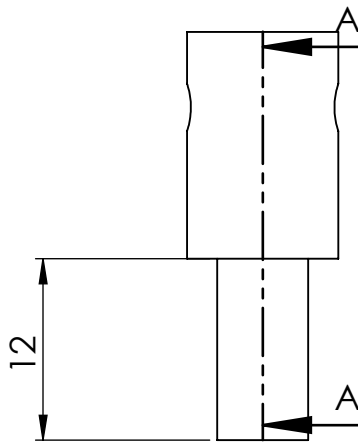
O veio do motor tem que entrar bem no orifício



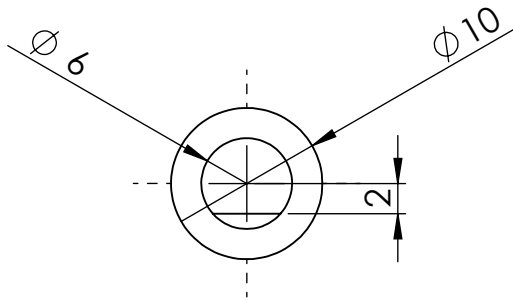
Ø 3.2 THRU ALL (FUROS PARA HELICOIL M3x 0.5)



Isometric View
Scale 2:1



SECTION A-A
SCALE 2 : 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	D.S		11-04-17
CHK'D	G.B		11-04-17
APPV'D			
MFG			
Q.A			

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

Alumínio

TITLE:

Adaptador motor

DWG NO.

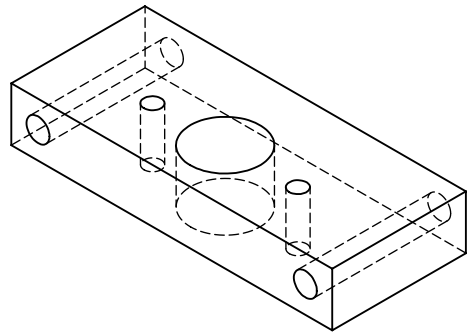
Sistema linear

A4

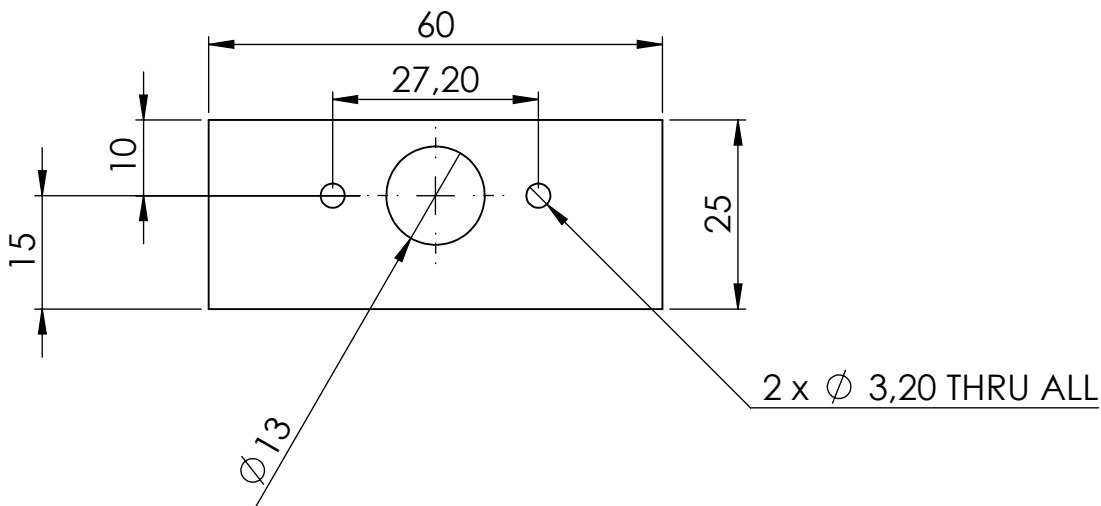
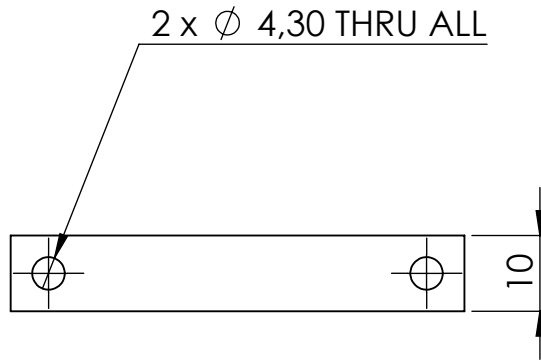
WEIGHT:

SCALE:2:1

SHEET 1 OF 2



Isometric View
Scale 1:1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	D.S		11-04-17		
CHK'D	G.B		11-04-17		
APPV'D					
MFG					
Q.A					
SOLIDWORKS Student Edition. For Academic Use Only.					
Alumínio					
WEIGHT:					

TITLE:

Suporte motor

DWG NO.

Sistema linear

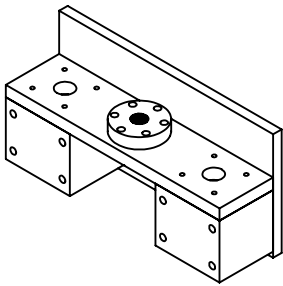
A4

SCALE:1:1

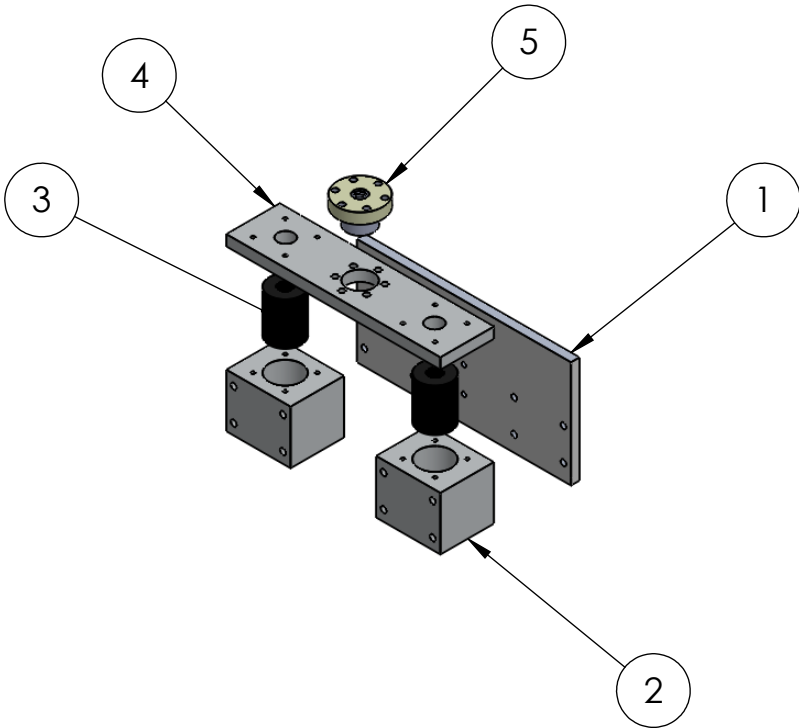
SHEET 2 OF 2

ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Plataforma	1
2	Apoio cilindro	2
3	Cilindro linear	2
4	Tampa 3	1
5	Porca trapezoidal	1

NOTA: Esta peça já está feita



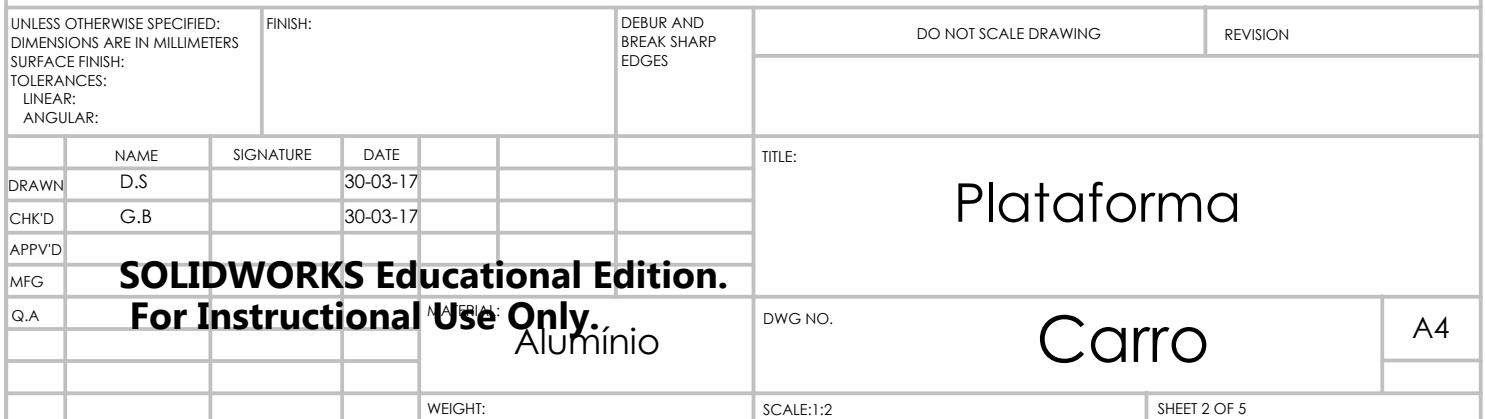
Vista Isométrica



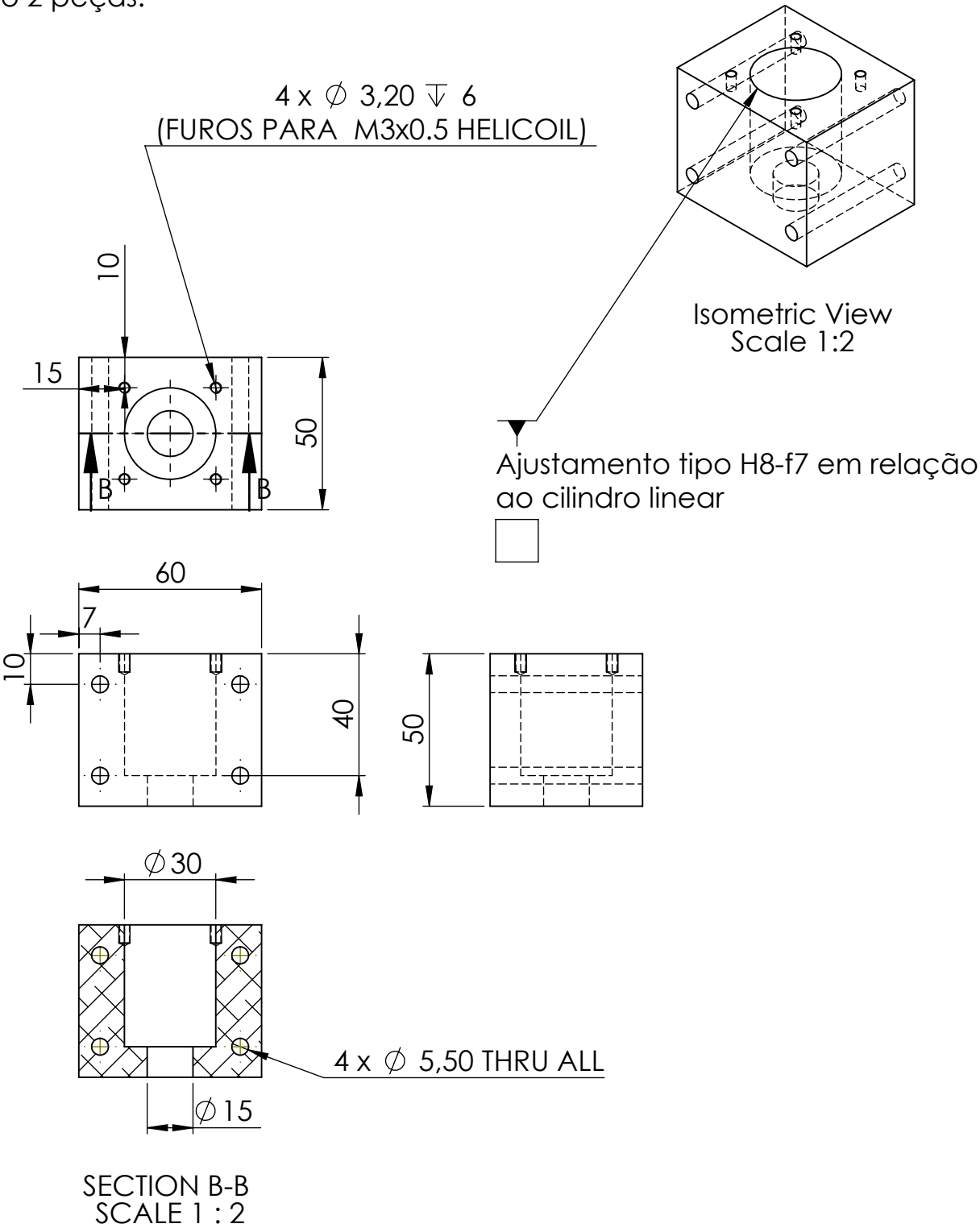
Vista explodida

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN		D.S		30-03-17					
CHK'D		G.B		30-03-17					
APPV'D									
MFG									
Q.A						DWG NO.			
						Carro			
						SCALE:1:5			
						SHEET 1 OF 5			

SOLIDWORKS Educational Edition.
For Instructional Use Only.



Nota: São 2 peças.



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	D.S		30-03-17
CHK'D	G.B		30-03-17
APPV'D			
MFG			
Q.A			

SOLIDWORKS Educational Edition.
For Instructional Use Only.

MATERIAL:
Alumínio

TITLE:

Apoio cilindro

DWG NO.

Carro

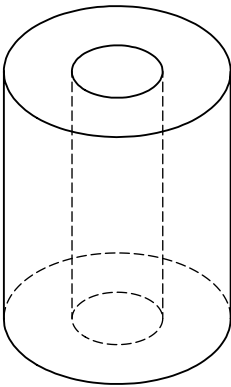
A4

WEIGHT:

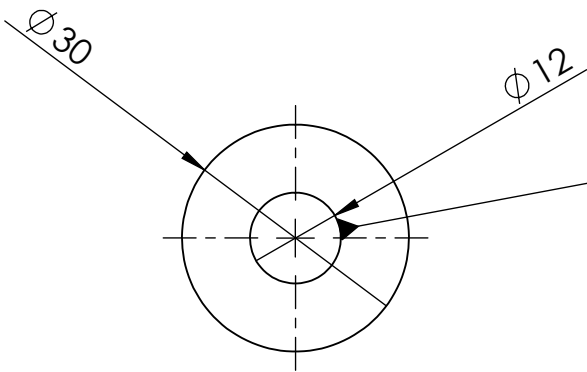
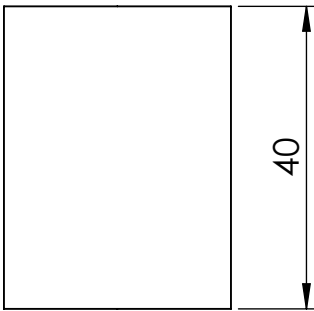
SCALE:1:2

SHEET 3 OF 5

Nota: São 2 peças



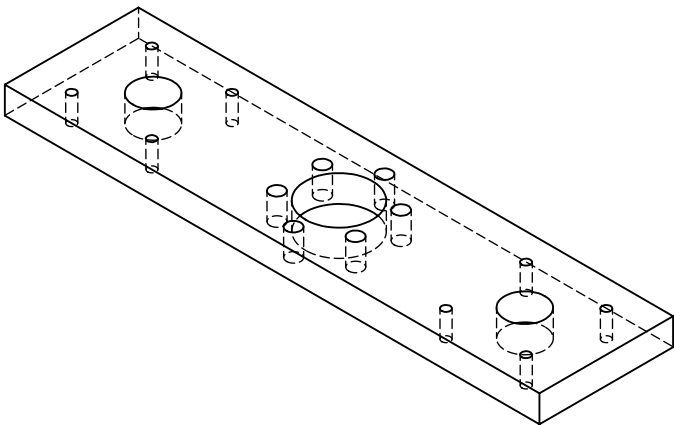
Isometric View
Scale 1:1



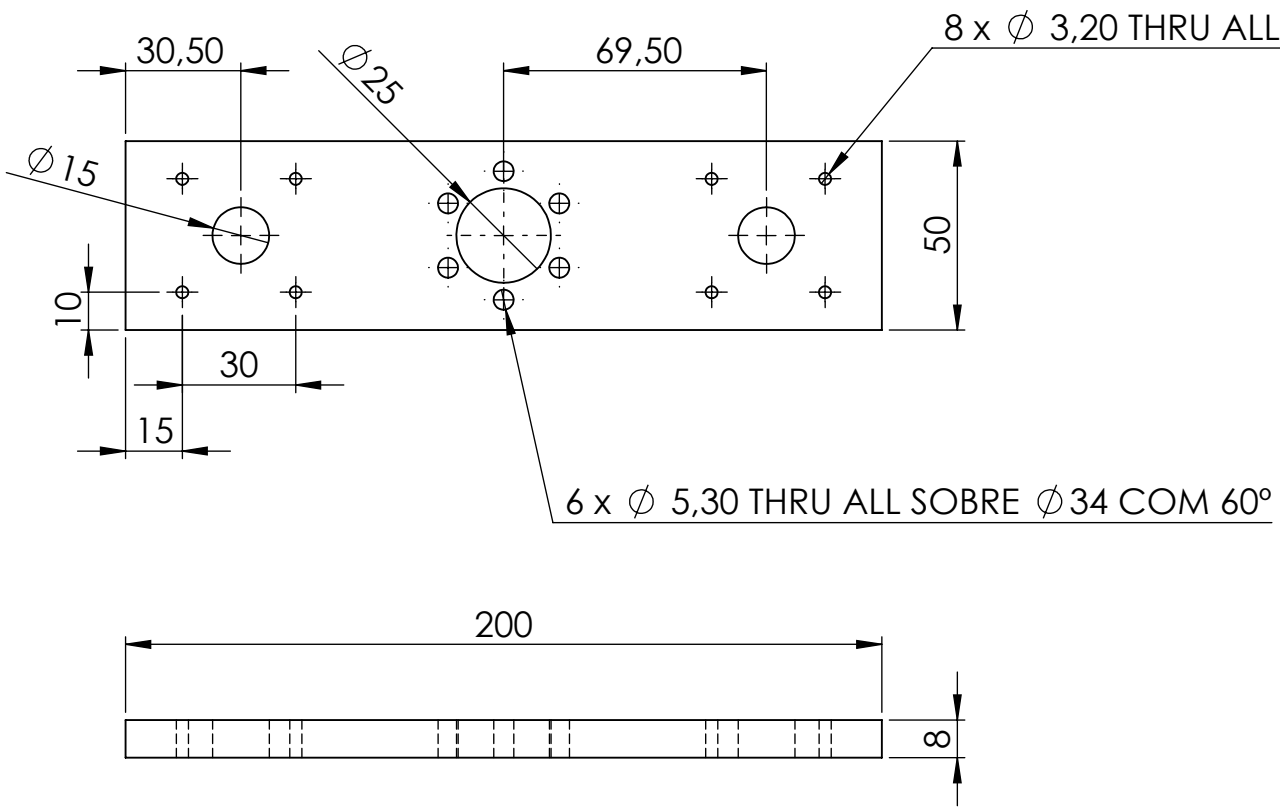
Ajustamento deslizante nos veio
(já existentes Ø 12) H7-g6

A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
						TITLE: Cilindro linear				
DRAWN D.S. 30-03-17						DWG NO. Carro				A4
CHK'D G.B. 30-03-17										
APPV'D										
MFG										
Q.A.										
SOLIDWORKS Educational Edition. For Instructional Use Only.										
Teflon grafitado										
WEIGHT:						SCALE:1:1				SHEET 4 OF 5



Isometric View
Scale 1:2



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	D.S		30-03-17		
CHK'D	G.B		30-03-17		
APPV'D					
MFG					
Q.A					

SOLIDWORKS Educational Edition.
For Instructional Use Only.

MATERIAL:

Alumínio

TITLE:

Tampa suportes e porca

DWG NO.

Carro

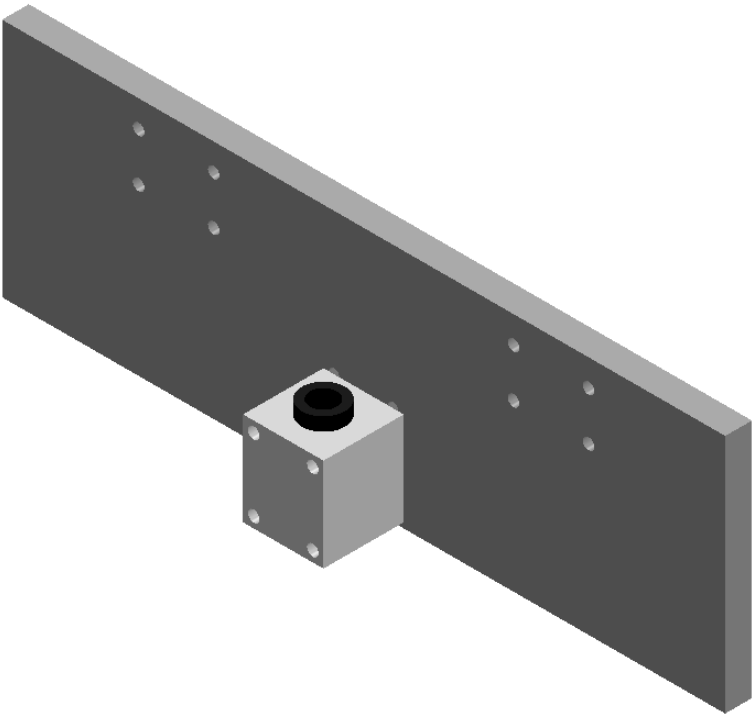
A4

WEIGHT:

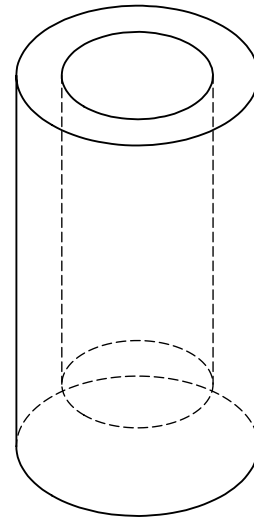
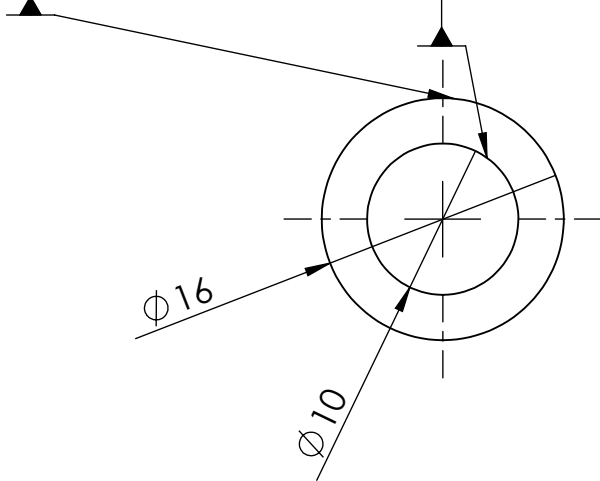
SCALE:1:2

SHEET 5 OF 5

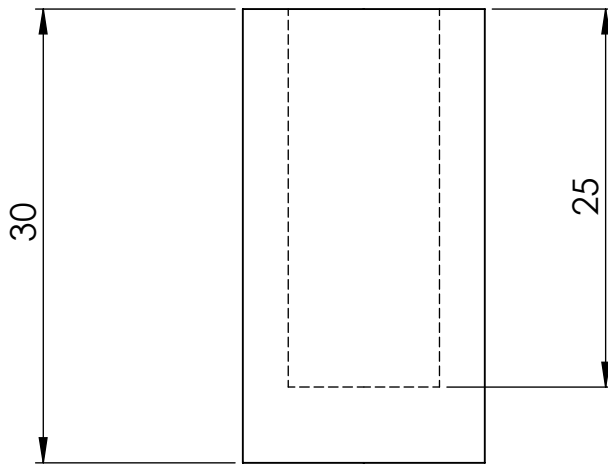
ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	apoio fuso (teflon grafitado)	1
2	apoio fuso(peça aluminio)	1
3	Chapa inferior	1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
	NAME	SIGNATURE	DATE			<div>TITLE:</div> <div>Apoio fuso</div>					
DRAWN	D.S		02-06-17								
CHK'D	G.B		02-06-17								
APPV'D											
MFG											
<div> <div>SOLIDWORKS Educational Edition.</div> <div>For Instructional Use Only.</div> </div>						MATERIAL:		<div>DWG NO.</div> <div>A4</div>			
Q.A											
						WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 4	

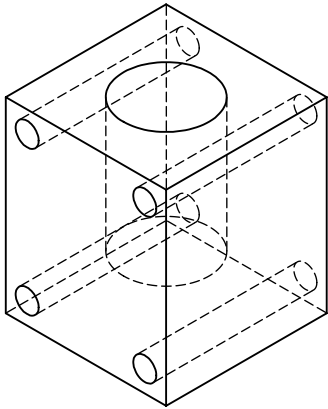
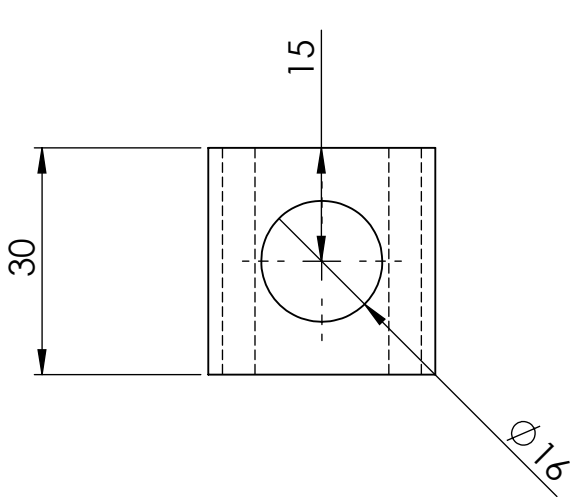


Isometric view
Scale 2:1

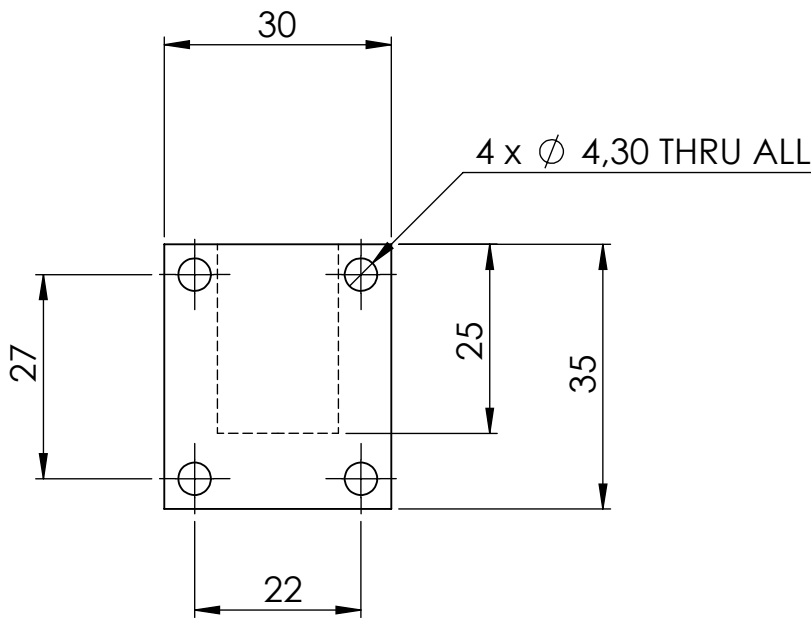


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING			REVISION			
	NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE: <div>Apoio fuso</div>					
DRAWN	D.S				02-06-17									
CHK'D	G.B				02-06-17									
APPV'D														
MFG														
Q.A				SOLIDWORKS Educational Edition. For Instructional Use Only.		MATERIAL: Teflon grafitado		DWG NO.					A4	
								Apoio fuso (peça teflon grafitada)						
						WEIGHT:		SCALE:2:1				SHEET 2 OF 4		

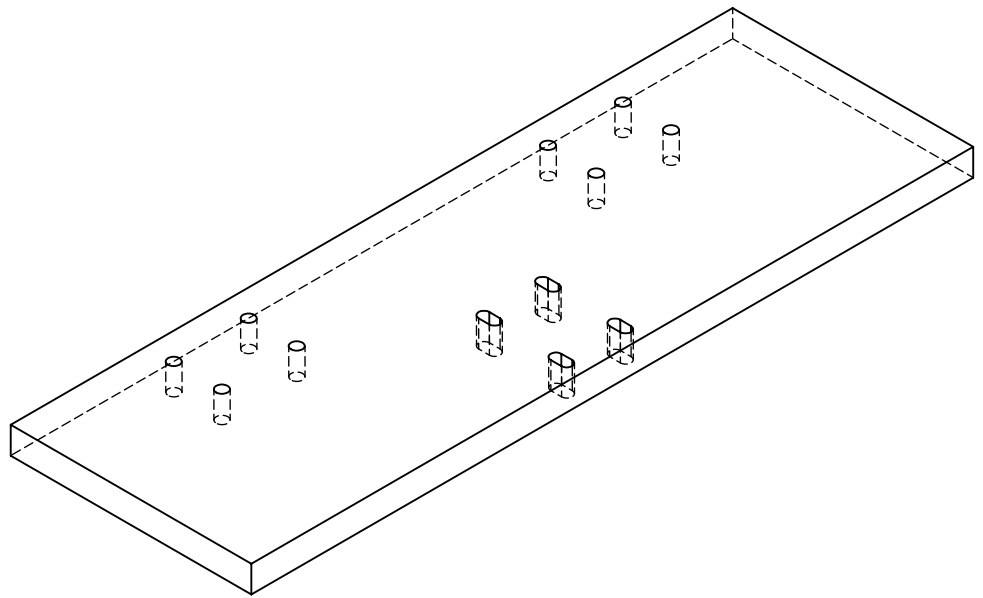
Nota: O diâmetro desta peça deve permitir que a peça grafitada escorrega bem



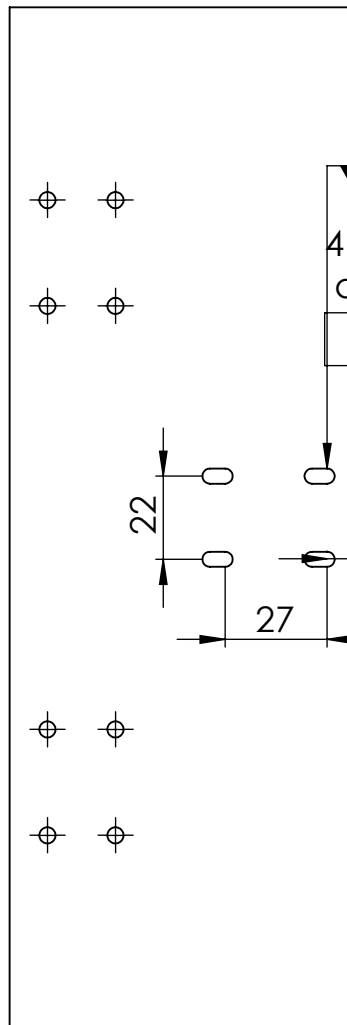
Isometric Vlew
Scale 1:1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHK'D		D.S				02-06-17		Apoio fuso	
APPV'D		G.B				02-06-17			
MFG									
Q.A									
SOLIDWORKS Educational Edition. For Instructional Use Only.		MATERIAL:		Alumínio		DWG NO.		Apoio fuso (peça alumínio)	
WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 3 OF 4		A4			



Isometric View
Scale 1:2



4 furos oblongos comprimento 4 mm centro a centro e \varnothing 4.3 de largura

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	D.S		02-06-17		
CHK'D	G.B		02-06-17		
APPV'D					
MFG					
Q.A					
SOLIDWORKS Educational Edition. For Instructional Use Only. MATERIAL: Aluminio					
				WEIGHT:	

TITLE:

Apoio fuso

DWG NO.

Chapa inferior

A4

SCALE:1:5

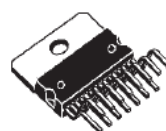
SHEET 4 OF 4

DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



Multiwatt15

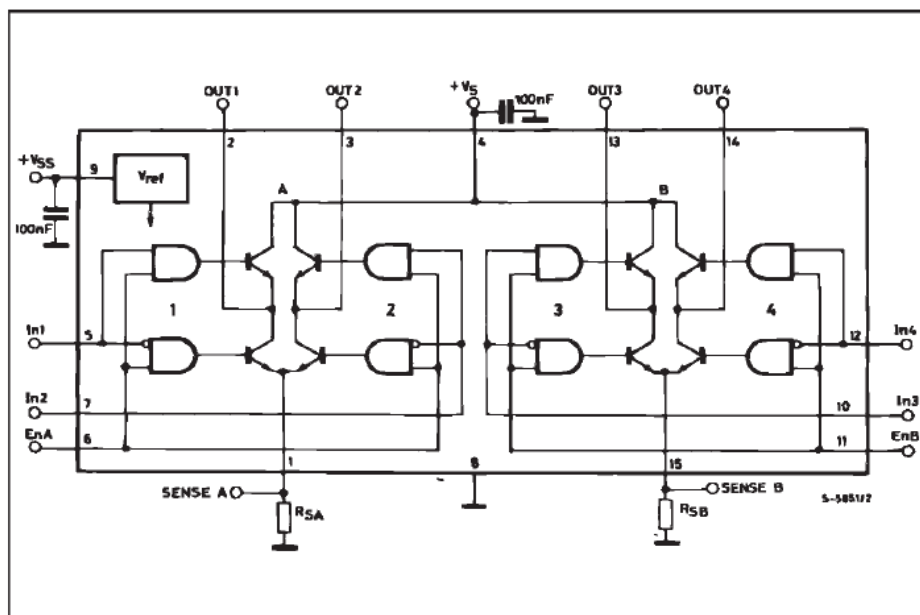


PowerSO20

ORDERING NUMBERS : L298N (Multiwatt Vert.)
L298HN (Multiwatt Horiz.)
L298P (PowerSO20)

nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

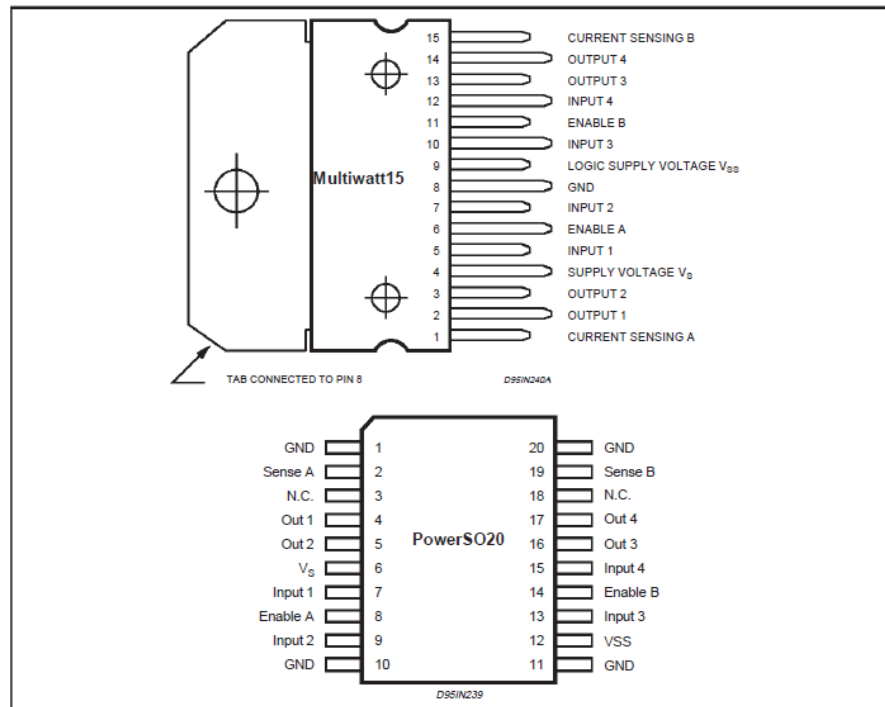
BLOCK DIAGRAM



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_S	Power Supply	50	V
V_{SS}	Logic Supply Voltage	7	V
V_i, V_{en}	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
I_o	Peak Output Current (each Channel) – Non Repetitive ($t = 100\mu s$) – Repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10ms$) – DC Operation	3 2.5 2	A A A
V_{sens}	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
P_{tot}	Total Power Dissipation ($T_{case} = 75^\circ C$)	25	W
T_{op}	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
T_{stg}, T_j	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

PIN CONNECTIONS (top view)



THERMAL DATA

Symbol	Parameter	PowerSO20	Multiwatt15	Unit
$R_{th j-case}$	Thermal Resistance Junction-case	Max. –	3	$^\circ C/W$
$R_{th j-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max. 13 (*)	35	$^\circ C/W$

(*) Mounted on aluminum substrate

PIN FUNCTIONS (refer to the block diagram)

MW.15	PowerSO	Name	Function
1;15	2;19	Sense A; Sense B	Between this pin and ground is connected the sense resistor to control the current of the load.
2;3	4;5	Out 1; Out 2	Outputs of the Bridge A; the current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 1.
4	6	V _S	Supply Voltage for the Power Output Stages. A non-inductive 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
5;7	7;9	Input 1; Input 2	TTL Compatible Inputs of the Bridge A.
6;11	8;14	Enable A; Enable B	TTL Compatible Enable Input: the L state disables the bridge A (enable A) and/or the bridge B (enable B).
8	1,10,11,20	GND	Ground.
9	12	V _{SS}	Supply Voltage for the Logic Blocks. A 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
10; 12	13;15	Input 3; Input 4	TTL Compatible Inputs of the Bridge B.
13; 14	16;17	Out 3; Out 4	Outputs of the Bridge B. The current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 15.
—	3;18	N.C.	Not Connected

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_S = 42V; V_{SS} = 5V, T_j = 25°C; unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V _S	Supply Voltage (pin 4)	Operative Condition	V _{IH} +2.5		46	V
V _{SS}	Logic Supply Voltage (pin 9)		4.5	5	7	V
I _S	Quiescent Supply Current (pin 4)	V _{en} = H; I _L = 0 V _i = L V _i = H		13 50	22 70	mA mA
		V _{en} = L V _i = X			4	mA
I _{SS}	Quiescent Current from V _{SS} (pin 9)	V _{en} = H; I _L = 0 V _i = L V _i = H		24 7	36 12	mA mA
		V _{en} = L V _i = X			6	mA
V _{IL}	Input Low Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		-0.3		1.5	V
V _{IH}	Input High Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		2.3		V _{SS}	V
I _{IL}	Low Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V _i = L			-10	μA
I _{IH}	High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V _i = H ≤ V _{SS} -0.6V		30	100	μA
V _{en} = L	Enable Low Voltage (pins 6, 11)		-0.3		1.5	V
V _{en} = H	Enable High Voltage (pins 6, 11)		2.3		V _{SS}	V
I _{en} = L	Low Voltage Enable Current (pins 6, 11)	V _{en} = L			-10	μA
I _{en} = H	High Voltage Enable Current (pins 6, 11)	V _{en} = H ≤ V _{SS} -0.6V		30	100	μA
V _{CEsat(H)}	Source Saturation Voltage	I _L = 1A I _L = 2A	0.95	1.35 2	1.7 2.7	V V
V _{CEsat(L)}	Sink Saturation Voltage	I _L = 1A (5) I _L = 2A (5)	0.85	1.2 1.7	1.6 2.3	V V
V _{CEsat}	Total Drop	I _L = 1A (5) I _L = 2A (5)	1.80		3.2 4.9	V V
V _{sens}	Sensing Voltage (pins 1, 15)		-1 (1)		2	V

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
T_1 (V)	Source Current Turn-off Delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		1.5		μs
T_2 (V)	Source Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		0.2		μs
T_3 (V)	Source Current Turn-on Delay	$0.5 V_i$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		2		μs
T_4 (V)	Source Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		0.7		μs
T_5 (V)	Sink Current Turn-off Delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.7		μs
T_6 (V)	Sink Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (3); (4)		0.25		μs
T_7 (V)	Sink Current Turn-on Delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		1.6		μs
T_8 (V)	Sink Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.2		μs
f_c (V)	Commutation Frequency	$I_L = 2A$		25	40	KHz
T_1 (V_{en})	Source Current Turn-off Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		3		μs
T_2 (V_{en})	Source Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		1		μs
T_3 (V_{en})	Source Current Turn-on Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		0.3		μs
T_4 (V_{en})	Source Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		0.4		μs
T_5 (V_{en})	Sink Current Turn-off Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		2.2		μs
T_6 (V_{en})	Sink Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (3); (4)		0.35		μs
T_7 (V_{en})	Sink Current Turn-on Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.25		μs
T_8 (V_{en})	Sink Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.1		μs

1) Sensing voltage can be $-1V$ for $t \leq 50 \mu s$; in steady state $V_{sens} \min \geq -0.5V$.

2) See fig. 2.

3) See fig. 4.

4) The load must be a pure resistor.

Figure 1 : Typical Saturation Voltage vs. Output Current.

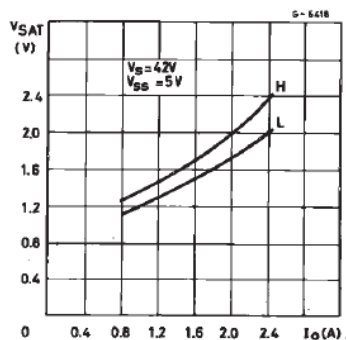
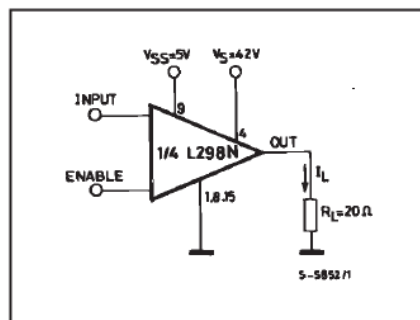


Figure 2 : Switching Times Test Circuits.



Note : For INPUT Switching, set EN = H
For ENABLE Switching, set IN = H